

1
VERSION 3

Réparation et rénovation des structures métalliques



Validé par



Le présent guide s'adresse aux entrepreneurs qui ont à réaliser une réparation d'ouvrage métallique. Il concerne aussi les deux autres acteurs de l'opération que sont le prescripteur et le contrôleur (maître d'œuvre ou son représentant).



Les trois intervenants,
le maître d'œuvre
(le prescripteur),
l'entrepreneur
et le contrôleur.

Ce guide technique a été relu et validé par le Comité Opérationnel « Génie Civil » de l'IDRRIM.

Créé en 2010 à l'initiative du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, de l'Assemblée des départements de France, de la Fédération professionnelle Syntec-Ingénierie et de la Fédération nationale des travaux publics et ses syndicats associés (tous signataires de la Convention d'engagement volontaire du 25 mars 2009), l'IDRRIM fédère l'ensemble des acteurs publics et privés agissant dans le domaine des infrastructures de mobilité et d'espaces urbains : État, collectivités locales, gestionnaires de réseaux, services techniques, ingénierie privée, fournisseurs, associations partenariales, écoles, centre de formation et organismes de recherche.

L'IDRRIM a pour missions de :

- Fédérer et mobiliser les acteurs de la profession ;
- Produire des documents de référence ;
- Contribuer à l'amélioration des compétences ;
- Promouvoir l'innovation et faire rayonner l'excellence française.



Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures
pour la Mobilité
9, Rue de Berri - 75008 Paris
Téléphone : 33(0)1 44 13 32 99
Télécopie : 33(0)1 42 25 89 99
Mél : idrrim@idrrim.com - Internet : www.idrrim.com

SOMMAIRE

PRÉAMBULE	7
1 LES MATERIAUX, LA CONSTRUCTION ET LA PATHOLOGIE DES OUVRAGES	9
1.1 Historique des matériaux métalliques en ouvrages d'art	10
1.1.1 Introduction	10
1.1.2 Rappel de métallurgie et propriétés des métaux	10
1.1.2.1 Rappels de métallurgie	10
1.1.2.2 Les propriétés des matériaux métalliques	11
1.1.3 LES MATÉRIAUX EMPLOYÉS	12
1.1.3.1 La fonte.....	13
1.1.3.2 Fer puddlé	14
1.1.3.3 Les aciers anciens	15
1.1.3.3.1 Principaux modes d'élaboration de l'acier	15
1.1.3.3.1.1 Le procédé Bessemer	16
1.1.3.3.1.2 Le procédé Thomas-Gilchrist.....	16
1.1.3.3.1.3 Le procédé Martin-Siemens.....	16
1.1.3.3.2 Caractéristiques métallurgiques des aciers anciens.....	17
1.1.3.4 Aciers modernes	19
1.1.3.4.1 Évolution métallurgique.....	21
1.1.3.4.2 Cas des aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique	23
1.1.3.4.3 Cas des aciers moulés.....	24
1.1.3.5 Les évolutions dimensionnelles	26
1.2 Historique des règlements et normes en ouvrages d'art métalliques	28
1.2.1 Rappel des règlements et normes	28
1.2.1.1 Les règlements	28
1.2.1.2 Les normes françaises	31
1.2.1.2.1 Les aciers de construction d'usage général.....	31
1.2.1.2.2 Les aciers à haute limite d'élasticité pour constructions soudées	31
1.2.1.2.3 Les autres aciers.....	32
1.2.1.3 Les normes européennes.....	33
1.3 Défauts et caractérisation des matériaux	34
1.3.1 Défauts rencontrés sur matériaux métalliques anciens	34
1.3.2 Datation et caractérisation des matériaux	37
1.4 Principales pathologies des ouvrages métalliques	39
1.4.1 La corrosion	39
1.4.2 La fragilité	49
1.4.3 La fatigue	55
1.4.4 La pathologie des assemblages rivés.....	59
1.4.5 La pathologie des assemblages boulonnés	62
1.4.6 La pathologie des assemblages soudés.....	64
1.4.7 Comportement au feu des structures métalliques	65
1.4.8 Autres pathologies.....	67

2 LA REPARATION DES OUVRAGES METALLIQUES	69
2.1 Méthodes et techniques de réparation	70
2.1.1 Généralités sur la démarche de diagnostic et le projet de réparation.....	70
2.1.2 Méthodes et techniques de réparation et renforcement des structures.....	71
2.1.2.1 Remplacement d'éléments endommagés.....	71
2.1.2.2 Ajout de matière.....	73
2.1.2.3 Déconsolidation d'assemblages rivés.....	76
2.1.2.4 Eviter les zones de concentration de contraintes, améliorer le comportement à la fatigue.....	77
2.1.2.5 Eviter ou limiter la corrosion.....	79
2.1.2.6 Utilisation des chaudes de retrait.....	80
2.1.2.7 Appareils d'appui.....	82
2.2 Réparation par soudage	86
2.2.1 Introduction.....	86
2.2.1.1 Définitions.....	86
2.2.1.2 Matériaux supports.....	87
2.2.2 Notions de métallurgie du soudage.....	87
2.2.3 Les déformations au soudage.....	92
2.2.4 Défauts métallurgiques au soudage.....	93
2.2.4.1 Fissuration à chaud.....	93
2.2.4.2 Arrachement lamellaire.....	94
2.2.4.3 Fissuration à froid.....	95
2.2.5 Techniques de soudage.....	98
2.2.5.1 Types d'assemblages soudés, types de soudures.....	98
2.2.5.2 Choix de la classe de qualité des assemblages soudés.....	99
2.2.5.3 Les procédés de soudage.....	102
2.2.5.3.1 Principes généraux.....	102
2.2.5.3.2 Soudage à l'arc avec électrode enrobée (n° 111 de la norme).....	102
2.2.5.3.3 Soudage à l'arc avec fil-électrode fusible fourré, sans protection de gaz (n° 114 de la norme).....	104
2.2.5.3.4 Soudage à l'arc des goujons (n° 784 de la norme).....	105
2.2.5.4 Choix des produits consommables pour soudage.....	107
2.2.5.5 Les défauts des soudures.....	108
2.2.5.6 Contrôle des soudures.....	109
2.2.6 L'exécution des travaux.....	109
2.2.6.1 Soudage : qualifications.....	109
2.2.6.2 Soudage : Documents fournis par l'entrepreneur.....	110
2.2.6.3 Soudage : Travaux en atelier.....	110
2.2.6.4 Soudage : Travaux sur chantier.....	110
2.2.7 Recommandations relatives aux matériaux métalliques anciens.....	111
2.2.7.1 Cas du fer puddlé.....	111
2.2.7.2 Cas des aciers anciens.....	114
2.2.7.3 Cas des aciers modernes.....	116
2.2.7.4 Cas particuliers : aciers autopatinables.....	116

2.3 Réparation par boulonnage	117
2.3.1 Généralités	117
2.3.2 Catégories d'assemblages boulonnés.....	118
2.2.2.1 Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de sollicitation.....	118
2.3.2.2 Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de fonctionnement ...	119
2.3.2.3 Récapitulation des différentes catégories d'assemblages boulonnés	121
2.3.3 Assemblages boulonnés à utiliser pour les ponts.....	122
2.3.3.1 Assemblages non précontraints.....	122
2.3.3.2 Assemblages précontraints sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons	123
2.3.3.3 Assemblages précontraints sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons	123
2.3.4 Historique réglementaire et normatif.....	124
2.3.4.1 L'aspect réglementaire : boulons à haute résistance	124
2.3.4.2 L'aspect normatif.....	125
2.3.4.2.1 Boulons ordinaires	125
2.3.4.2.2 Boulons à haute résistance	126
2.3.4.3 Indications normalisées et marquage NF des boulons	128
2.3.4.4 Production étrangère - Boulons HV.....	129
2.3.5 Calcul des assemblages boulonnés	130
2.3.5.1 Calcul des assemblages non précontraints	130
2.3.5.2 Calcul des assemblages précontraints	130
2.3.6 Exécution des assemblages boulonnés	132
2.3.6.1 Exécution des assemblages non précontraints	132
2.3.6.2 Exécution des assemblages précontraints	133
2.3.6.3 Préparation des assemblages	133
2.3.6.3.1 Diamètre des trous.....	133
2.3.6.3.2 Usinage des trous.....	133
2.3.6.3.3 Tolérances de perçage	133
2.3.6.3.4 Choix des dimensions des boulons.....	134
Diamètres des boulons	134
Longueur des vis.....	134
Ecrous	134
Rondelles.....	134
2.3.6.3.5 Espacements des boulons – Pincés	135
2.3.6.3.6 Emploi de fourrure	135
2.3.6.3.7 Préparation des surfaces de frottement.....	136
2.3.6.3.8 Serrage des boulons HR	137
2.3.7 Contrôle du serrage des boulons après exécution des assemblages précontraints.	139
2.3.7.1 Généralités	139
2.3.7.2 Contrôle par desserrage et resserrage de l'écrou	139
2.3.7.3 Contrôle par surserrage de l'écrou.....	140
2.3.8 Les différents types de boulons	140
Les boulons - système HR	140
Les boulons - système HV	140
Les boulons HRC	140
Les boulons hexagonaux injectés	141
Les rivetons ou boulons sertis	142

2.3.9 Réparation par assemblages boulonnés	143
2.3.9.1 Généralités sur les assemblages	143
2.3.9.2 Remplacement de boulons	143
2.3.9.3 Assemblages mixtes.....	143
2.4 Réparation par rivetage	145
2.4.1 Généralités	145
2.4.2 Mode de sollicitation des assemblages rivés	146
Effort perpendiculaire à l'axe du rivet (cisaillement).....	147
Effort parallèle à l'axe du rivet (traction).....	147
2.4.3 Historique réglementaire et normatif	148
2.4.3.1 L'aspect réglementaire : rivets	148
2.4.3.2 L'aspect normatif	150
2.4.3.3 Assemblages rivés – Dispositions constructives.....	151
2.3.3.3.1 Conditions de distance des rivets.....	152
2.3.3.3.2 Conditions d'épaisseur des pièces assemblées	152
2.3.3.3.3 Section de calcul.....	153
2.4.3.4 Assemblages rivés – Exécution des assemblages.....	154
2.3.3.4.1 Perçage des trous.....	154
2.4.3.4.2 Assemblage.....	155
2.4.3.4.3 Contrôle des rivets	156
2.4.3.4.4 Travaux de réparation : dérivetage	156
2.4.4 La pratique de réparation par rivetage.....	157
BIBLIOGRAPHIE	159
TABLE DES ILLUSTRATIONS	160
TABLEAUX	166
ANNEXE N°1 : DOCUMENTS DE REFERENCE	167
ANNEXE N°2 : TABLEAU SIMPLIFIE DES NUANCES ET QUALITES D'ACIER, REGLEMENTS ET NORMES APPLIQUEES EN FRANCE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES D'ART	177
ANNEXE N°3 : REGLEMENTS DE CALCUL.....	179
ANNEXE N°4 : SOMMAIRE NF EN 1090-2 2011.10	181
ANNEXE N°5 : SOMMAIRE DU GUIDE TECHNIQUE DU LCPC : ENTRETIEN DE LA PROTECTION ANTICORROSION DES OUVRAGES METALLIQUES	191

Les définitions des termes concernant la construction métallique et les termes métallurgiques sont regroupés dans les glossaires :

<http://www.otua.org/LexVO/Accueil.html>

<http://www.otua.org/FABACIER/Glossaire/IntroGlossaire.html>

PRÉAMBULE

D'une façon générale les techniques et méthodes de construction classiques sont employées en réparation, mais celles-ci doivent prendre en compte les spécificités des matériaux employés au cours du temps. Les procédés d'élaboration des matériaux métalliques et les techniques d'assemblages ont évolué au fur et à mesure du développement industriel. Il convient donc de procéder à des travaux de réparation en bonne connaissance des propriétés des matériaux, des modes d'assemblages, des règles de dimensionnement utilisées lors de la construction. Plus particulièrement, les matériaux métalliques ont fait l'objet d'évolutions importantes. Ainsi, l'utilisation de la fonte, des fers puddlés, puis des aciers, met en évidence des caractéristiques très différentes, mais l'évolution elle-même des aciers, depuis le début du XX^{ème} siècle, montre aussi des caractéristiques et comportements très variables qu'il convient d'intégrer dans tout projet de réparation. L'évolution la plus importante pour les aciers est constituée par l'aptitude à la soudabilité qui est apparue progressivement à partir des années 1930 parallèlement au développement des techniques de soudage et des recherches sur la soudabilité métallurgique des aciers.

Ce guide s'applique à la réparation des ouvrages d'art métalliques à l'exclusion des ouvrages en alliage d'aluminium et de la partie suspension des ouvrages suspendus et à haubans. Il est élaboré par regroupement de documents existants et intègre différents extraits bibliographiques nécessaires à la compréhension des phénomènes, tels qu'un historique des matériaux métalliques employés, des règlements et normes, un inventaire des techniques de réparation.... Ces extraits bibliographiques sont actualisés, compte tenu de l'évolution normative très active dans le domaine de la construction métallique. De nombreux extraits sont empruntés au Guide du Maître d'œuvre - *Travaux de construction en acier* du SETRA (2001) qui concerne la construction des ouvrages métalliques. Nous proposons le renvoi à ce document de référence pour les phases où réparation et construction neuve se confondent pour les procédures appliquées. La revue *Ponts Métalliques n° 20* de l'OTUA représente également un document de référence pour la connaissance des matériaux employés.

La version initiale de ce guide a été publiée avant la publication de la norme NF EN 1090 2 Exécution des structures en acier et des structures en aluminium – Partie 2 : Exigences techniques pour les structures en acier, devenue depuis le référentiel de tous travaux sur structures métalliques. Cette norme regroupe en un seul document l'ensemble des éléments concernant l'exécution des ouvrages. Le sommaire de cette norme figure en annexe 4.

Le guide « Métal » est structuré en 2 parties :

> Partie 1 : Les matériaux, la construction et la pathologie des ouvrages :

- Les différents matériaux métalliques employés dans le temps, leurs caractéristiques,
- La réglementation et normalisation
- Les principaux désordres et la caractérisation des matériaux anciens
- Les principales pathologies des ouvrages métalliques

> **Partie 2 : les techniques de réparation :**

- les principales méthodes et techniques de réparation,
- la réparation par soudage des ouvrages d'art métalliques,
- la réparation par boulonnage des ouvrages d'art métalliques,
- la réparation par rivetage des ouvrages d'art métalliques.

Une partie initialement prévue sur l'entretien de la protection anticorrosion des ouvrages métalliques n'a pas été retenue, car elle fait l'objet de publications auxquelles nous faisons renvoi :

- guide technique *Entretien de la protection anticorrosion des ouvrages métalliques*, publié par le LCPC – décembre 2005 (bibliographie [24]), dont le sommaire figure en annexe 5 ;
- fiche n°XVIII-1 *Protection contre la corrosion - Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art* – MEMOAR - Collection de fiches techniques – SETRA (bibliographie [25]) ;
- guide STRRES Maintenance et réparation de la protection anticorrosion [FAME 2] en cours d'élaboration au moment de la parution du présent guide FAME 1 V3.

1

Les matériaux, la construction et la pathologie des ouvrages

- 1.1 Historique des matériaux métalliques en ouvrages d'art
- 1.2 Historique des règlements et normes en ouvrages d'art métalliques
- 1.3 Défauts et caractérisation des matériaux
- 1.4 Principales pathologie des ouvrages métalliques

1.1.1 INTRODUCTION

Après la maçonnerie et le bois, les matériaux métalliques ont été employés pour la construction des ouvrages dès la fin du XVIII^{ème} siècle. C'est en 1779 avec la construction du pont sur la Severn, à Coalbrookdale en Angleterre que débute l'histoire des ponts métalliques. Trois alliages à base de fer, la fonte, le fer puddlé et l'acier, constitueront les principales périodes de construction des ouvrages métalliques.

1.1.2 RAPPEL DE MÉTALLURGIE ET PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX

1.1.2.1 Rappels de métallurgie

En fonction de la température, le fer pur présente différentes formes de réseaux cristallographiques. D'un réseau cubique centré CC (fer α ou ferrite) à basse température, le fer se transforme en réseau cubique à faces centrées CFC (fer γ ou austénite) à 912°C pour ensuite retrouver un réseau cubique centré à haute température avant la transformation solide-liquide.

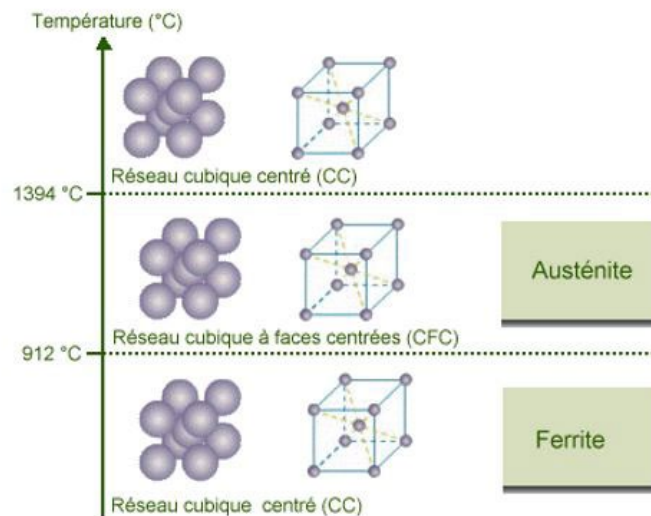


Fig. 1 : Transformations allotropiques du fer (document OTUA).

Les propriétés des alliages fer - carbone sont caractérisées dans le diagramme de phases en fonction de la composition chimique et de leur processus d'élaboration (cycles thermiques). Le diagramme de phases Fe - C présente les domaines de solubilité des atomes de carbone dans le fer aux différentes températures et les niveaux de transformations allotropiques. Le diagramme simplifié présenté ci-après est établi dans des conditions de chauffe et refroidissement lents. Nous pouvons remarquer que la structure CFC - fer γ à haute température « dissout » une quantité d'atomes de carbone plus importante que la structure CC - fer α à basse température.

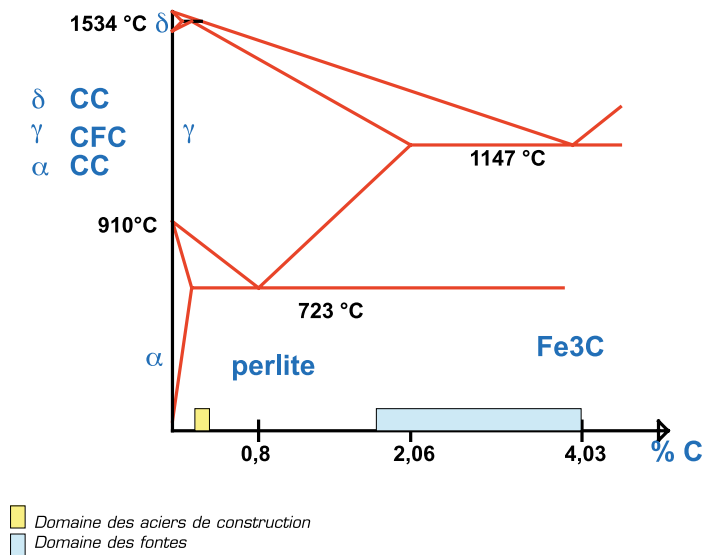


Fig. 2 : Diagramme de phases Fer - Carbone (diagramme simplifié) - (document Jean-Paul PERSY).

La composition chimique avec les éléments d'addition et les phénomènes thermiques liés à l'élaboration génèrent les propriétés des différents aciers et fontes.

1.1.2.2 Les propriétés des matériaux métalliques

Pour plus de détails sur les moyens de détermination des caractéristiques mécaniques et leur signification, nous renvoyons le lecteur aux documents cités en [10] et [11] de la bibliographie. Pour la compréhension de ce guide technique, nous limiterons la présentation aux seuls essais de traction et de résilience qui caractérisent les nuances et qualités des aciers.

L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique dont les procédures sont totalement normalisées (NF EN Iso 6892 rév. 09-B10).

> Sur un diagramme **Effort - Déformation** les caractéristiques classiques mesurées sont :

- La limite élastique de l'acier R_e successivement exprimé en kg/mm^2 puis hbars, puis Mpa ou N/mm^2 .
- La charge maximale en traction R_m ou charge de rupture successivement exprimée en kg/mm^2 puis hbars, puis Mpa ou N/mm^2 .
- L'allongement exprimé en %.

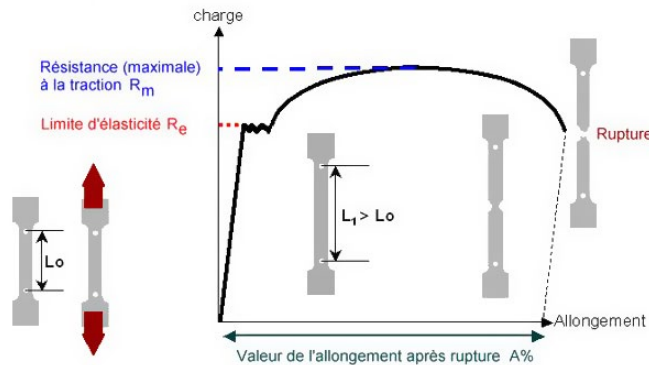


Fig. 3 : Courbe de traction et caractéristiques mécaniques (document OTUA).

L'essai de résilience caractérise l'énergie absorbée par la rupture d'une éprouvette entaillée (NF EN 10045). Cet essai réalisé à différentes températures permet le classement des qualités d'acier et représente une caractérisation du risque de rupture fragile et de la soudabilité du matériau. D'abord pratiquée sur éprouvette à entaille en U et exprimé en J/cm^2 , cet essai est maintenant réalisé sur entaille en V et exprimé en joules.

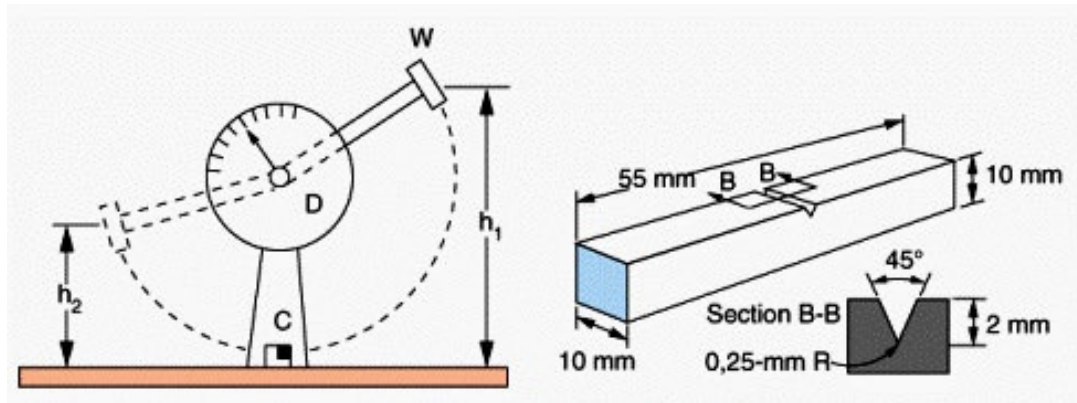


Fig. 4 : Schéma de principe d'un essai de résilience : mouton pendule et éprouvette à entaille en V (document OTUA).

1.1.3 LES MATÉRIAUX EMPLOYÉS

A la fin du XVIII^{ème} siècle les méthodes industrielles de fabrication des alliages de fer permettaient l'élaboration de fonte, alliage comportant une teneur en carbone de l'ordre de 3 %, de caractéristiques médiocres, ce qui favorisa la réalisation de structures fonctionnant en compression, inspirées des ouvrages en maçonnerie – structure en arc.

A partir de 1820 le développement de techniques industrielles d'élaboration du fer sous forme de fer puddlé, présentant une meilleure résistance en traction, permet la construction d'ouvrages à poutres.

La seconde moitié du XIX^{ème} siècle va être marquée par l'apparition des procédés d'élaboration de l'acier ; les procédés Bessemer (1856), puis Siemens-Martin (1865) et Thomas (1877), vont permettre la production de ce matériau en grande quantité. Grâce à ses caractéristiques mécaniques, et principalement sa résistance élevée, l'acier va totalement remplacer, au début du XX^{ème} siècle, la fonte et le fer dans la fabrication de ponts.

Le schéma ci-après présente de façon synthétique l'évolution, en fonction du temps, des différents matériaux métalliques, des modes d'assemblage et des règlements de calcul (jusqu'en 1940) pour ouvrages d'art.

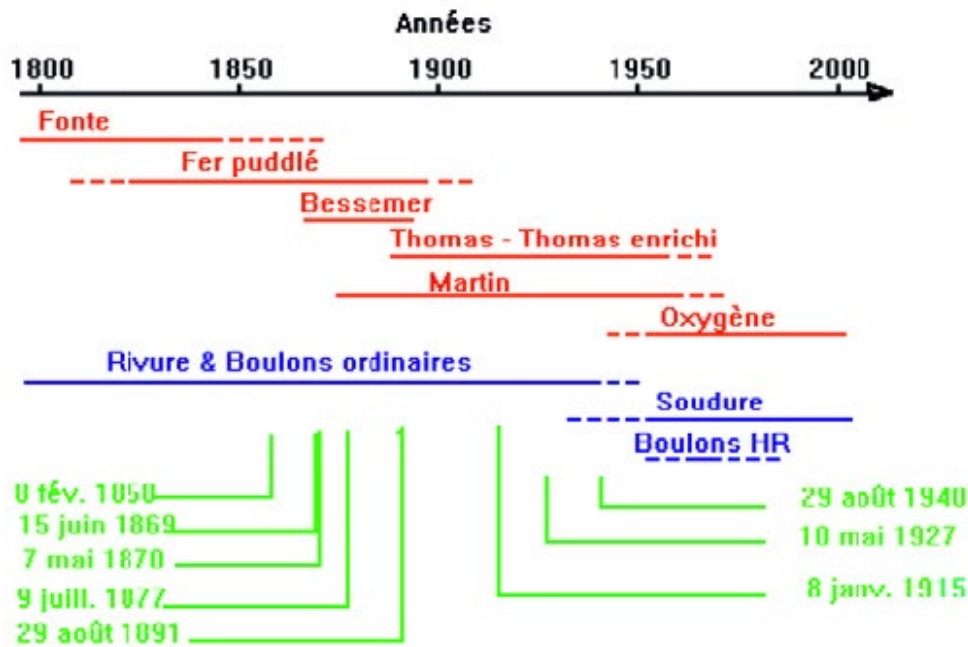


Fig. 5 : Historique des ouvrages d'art métalliques (jusqu'en 1940) - (document Jean-Paul PERSY).

1.1.3.1 La fonte

Le premier pont métallique en fonte a été construit sur la Severn, à Coalbrookdale en Angleterre en 1779, cette expérience a été suivie de plusieurs autres ouvrages, toujours en Angleterre. C'est dans les premières années du XIX^{ème} siècle que fut construite la passerelle des Arts (1803), premier ouvrage en fonte construit à Paris.

La fonte fut utilisée dans de nombreux ponts au XIX^{ème} siècle, mais la plupart des ouvrages eurent une durée de vie limitée. La fonte est en effet un matériau fragile, de faible résistance à la traction comme en témoignent les caractéristiques retrouvées pour les produits de cette époque (bibliographie [7]) :

Carbone	3 à 3,5 %
Silicium	2 à 3,5 %
Limite d'élasticité	50 à 100 N/mm ²
Résistance à la traction	100 à 180 N/mm ²

Les matériaux employés sont des fontes à structure perlitique à graphite lamellaire présentant des teneurs en phosphore souvent élevées, lequel constitue un élément fragilisant qui précipite sous forme de staedite (eutectique phosphoreux).

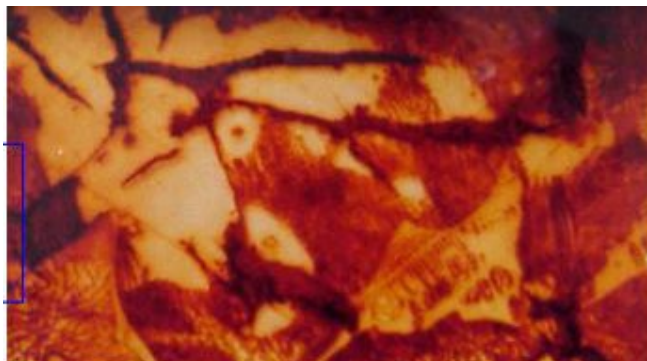


Fig. 6 : Structure métallographique d'une fonte phosphoreuse à graphite lamellaire (photo Jean-Paul PERSY).



Fig. 7 : Pont de Coalbrookdale sur la Severn (document bibliographique).

1.1.3.2 Fer puddlé (extrait de bibliographie [4])

> **Au cours du XIX^{ème} siècle l'utilisation du fer s'est développée parallèlement à celle de la fonte. Trois grands types de ponts étaient construits avec ce matériau :**

- les ponts suspendus,
- les ponts à poutres,
- les ponts en arc.

Le fer était obtenu par puddlage (*to puddle* signifie brasser) à partir de fonte liquide introduite dans un four à réverbère et mélangée à des additions oxydantes. Après fusion, le métal était épuré : c'était l'opération de puddlage par brassage du bain au moyen d'un ringard ; celle-ci était suivie d'une phase de décarburation en atmosphère oxydante à une température inférieure à la température de fusion du fer.

La charge des fours à sole était de 200 kg environ ; le fer ainsi obtenu était formé en loupes de l'ordre de 30 kg. Ces dernières étaient ensuite portées au pilon cingleur qui avait pour rôle d'expulser les scories et de rendre le métal compact. Cette opération devait se faire à température élevée pour permettre l'élimination, la plus importante possible, des scories. Les loupes étaient « soudées » entre elles par corroyage avec élévation de température. Le produit résultant était un matériau mixte composé de fer presque pur (très faibles teneurs en carbone et manganèse) et d'une scorie siliceuse répartie en fins filaments.

> **Le fer puddlé ainsi obtenu présentait, selon diverses bibliographies de l'époque, une composition chimique approchée :**

- carbone : 0,01 %,
- manganèse : 0,02 %,
- phosphore : 0,2 %,
- soufre : 0,05 %,
- silicium : 0,2 %.

Les analyses réalisées sur de nombreux échantillons en provenance d'ouvrages répartis sur l'ensemble du réseau national donnent des fourchettes plus larges, principalement en ce qui concerne le phosphore : la teneur fréquemment rencontrée atteint 0,5% (notamment pour les produits obtenus à partir de minerai lorrain) et quelques fois dépasse 1%.

Le fer puddlé se caractérise par une structure métallographique de type ferritique (solution solide de fer α) présentant une densité variable d'inclusions parallèles au sens du laminage. Ces inclusions, constituées d'oxydes de fer, de silicium et de phosphore, entraînent des discontinuités dans la matrice ferritique et lui confèrent un aspect lamellaire (fig. 8).

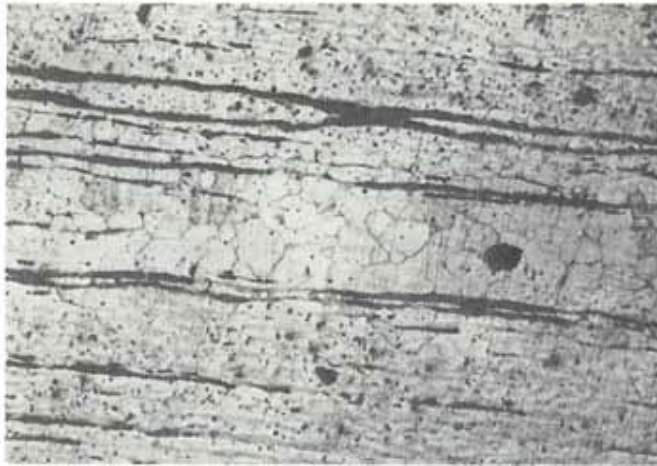


Fig. 8 : Métallographie sur fer puddlé (photo Jean-Paul PERSY).

La plupart des inclusions sont constituées par des dendrites de Fe_3O_4 entourées par des phosphosilicates de fer ; les sulfures sont plus ou moins abondants et répartis à l'intérieur de la plupart des inclusions, mais pratiquement jamais sous forme de sulfures isolés.

Il faut noter que le phosphore ne se trouve pas réparti uniformément dans la masse, mais concentré en grande partie dans les scories interposées entre les lamelles de fer.

Le procédé d'élaboration entraîne un grossissement du grain ferritique, ce qui représente un facteur de fragilité.

> **Les caractéristiques mécaniques de ces fers sont hétérogènes avec les valeurs suivantes :**

- limite d'élasticité (E) : 230 à 300 N/mm² (mesures sur ouvrages, la bibliographie donne des valeurs plus basses à 170 N/mm²),
- charge de rupture (R) : 260 à 400 N/mm²,
- allongement (A) : 10 à 20 % (dans le sens de laminage) : sensiblement nul (en sens travers).

1.1.3.3 Les aciers anciens (extrait de bibliographie [5])

1.1.3.3.1 Principaux modes d'élaboration de l'acier

Au milieu du XIX^{ème} siècle, la nécessité d'une production massive d'acier se fait sentir dans différents domaines (chemin de fer en particulier), mais l'acier obtenu par fusion au creuset atteignant un prix fort élevé, divers procédés vont faire leur apparition.

1.1.3.3.1.1 Le procédé Bessemer

Ayant remarqué que l'action oxydante du vent transforme la fonte en fer malléable, l'anglais Henry Bessemer réussit à produire de l'acier de façon industrielle en insufflant de l'air à travers la fonte liquide.

Selon ce principe, la fonte en fusion est versée dans une cornue de métal garnie d'un revêtement réfractaire. L'air, qui est envoyé sous pression à travers le bain liquide par des orifices ménagés à la base de l'appareil, provoque la combustion des «impuretés» telles que le carbone ou le silicium. La combustion du carbone entraîne une élévation de température qui suffit à maintenir le métal liquide. La mise au point du revêtement intérieur aboutit vers 1862 à un revêtement réfractaire acide.

L'emploi du procédé Bessemer était considérablement limité par l'obligation de n'utiliser que des fontes très pures, faute de quoi l'acier obtenu était cassant à chaud comme à froid.

1.1.3.3.1.2 Le procédé Thomas-Gilchrist

L'exploitation du minerai lorrain à teneur élevée en phosphore nécessita la mise au point du procédé Thomas et Gilchrist, (brevet de 1877). Plus tard, une amélioration fut apportée au procédé par enrichissement en oxygène de l'air soufflé dans le convertisseur.



Fig. 9 : Schéma convertisseur Thomas (document OTUA).

1.1.3.3.1.3 Le procédé Martin-Siemens

En 1856, les trois frères Siemens construisent un four selon le principe de la récupération de chaleur. Par une mise au point judicieuse de la sole (remplacement de l'argile, qui ne résistait pas aux hautes températures, par du quartz et des briques de silice), Pierre Émile Martin réussit à fondre des déchets d'acier. Rapidement, le four Martin-Siemens put traiter la fonte.

Dans le procédé Martin, l'affinage de l'acier est réalisé par échanges avec le laitier oxydant. Ce procédé, beaucoup plus lent (6 h environ) que le procédé Thomas, permet d'obtenir des aciers de meilleure qualité.

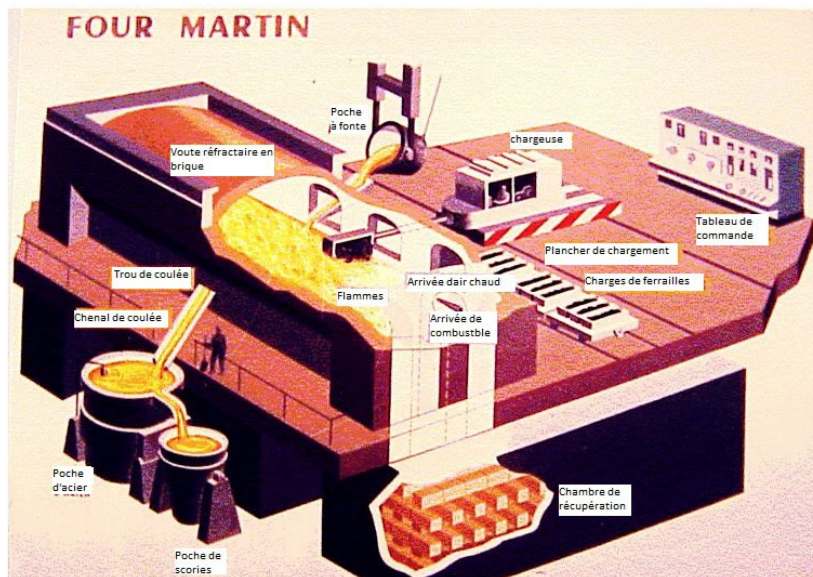


Fig. 10 : Schéma d'un four Martin (document OTUA).

Les procédés traditionnels Bessemer, Thomas et Martin ont cédé progressivement le pas aux aciers à l'oxygène et à l'acier électrique, lequel a été longtemps réservé à l'élaboration des aciers spéciaux.

1.1.3.3.2 Caractéristiques métallurgiques des aciers anciens

Les aciers de construction sont des alliages fer – carbone dont les teneurs en carbone sont variables selon le mode d'élaboration et la nuance recherchée. D'autres éléments sont présents car ils n'ont pu être éliminés à l'élaboration ; certains sont nocifs, tels que le phosphore, le soufre, l'azote et constituent des impuretés.

La structure métallographique de ces aciers est de type ferrite – perlite souvent à grains grossiers correspondant à un refroidissement non contrôlé.

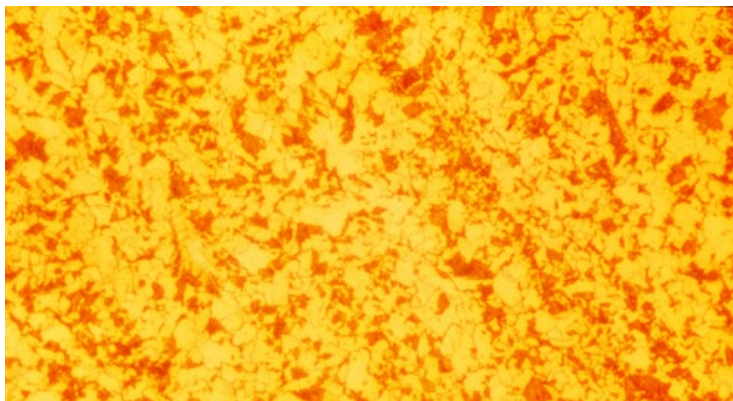


Fig. 11 : Structure métallographique ferrite – perlite d'un acier ancien (C : ~ 0.18 %) - (photo Jean-Paul PERSY).

Les principaux éléments chimiques retenus pour caractériser le mode d'élaboration sont l'azote, le nickel, le chrome, le cuivre, le phosphore, le soufre. Le tableau I synthétise ces domaines de composition pour les procédés d'élaboration des années 1930 environ, procédé Thomas, Thomas enrichi (où l'air insufflé est enrichi en oxygène) et Martin.

Éléments	Aciers		
	. Procédés d'élaboration		
	Thomas	Thomas enrichi	Martin
Azote	> 15	7 < N < 15	< 12
Nickel, chrome, cuivre	30	30	100
Phosphore	40 à 80	30 à 60	< 40
Soufre	30 à 80	20 à 50	< 40

Teneurs indicatives pour une production soignée (exprimées en $\% \times 10^1$).

Tableau I : Caractérisation chimique des procédés d'élaboration de l'acier (~1930).

Les diagrammes de la figure 12 montrent, d'après B. Getzov [bibliographie [20] et [5]], les variations de R, Re et A % pour les aciers obtenus par divers procédés d'élaboration.

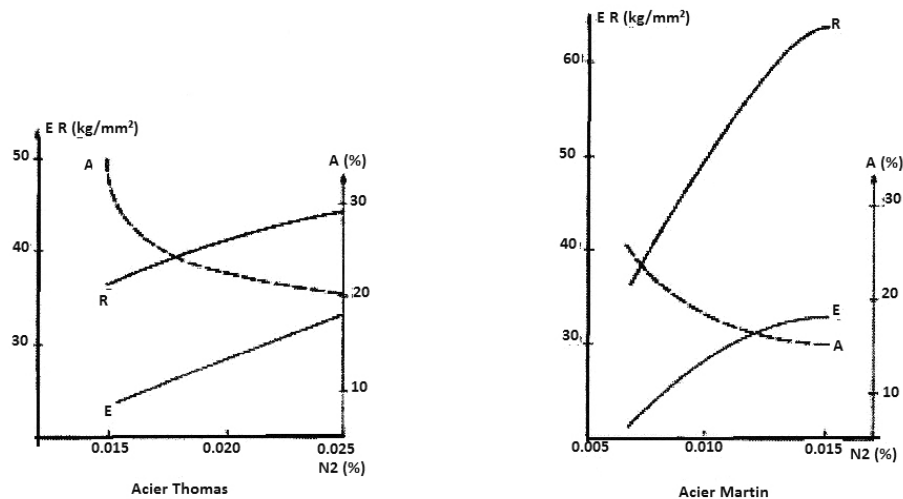


Fig. 12 : Variations de R, Re et A % pour les aciers obtenus par divers procédés d'élaboration. Selon Getzov - 1931 (bibliographie [20] et [5]).

Le phosphore est un élément fragilisant, il abaisse fortement la résilience des produits bruts de laminage. La chute de résilience, sous l'effet des teneurs élevées en phosphore, est beaucoup plus importante pour les produits Thomas que pour les produits Martin. Elle est surtout accentuée au-delà de 0,07 % de phosphore (bibliographie [21] et [5]).

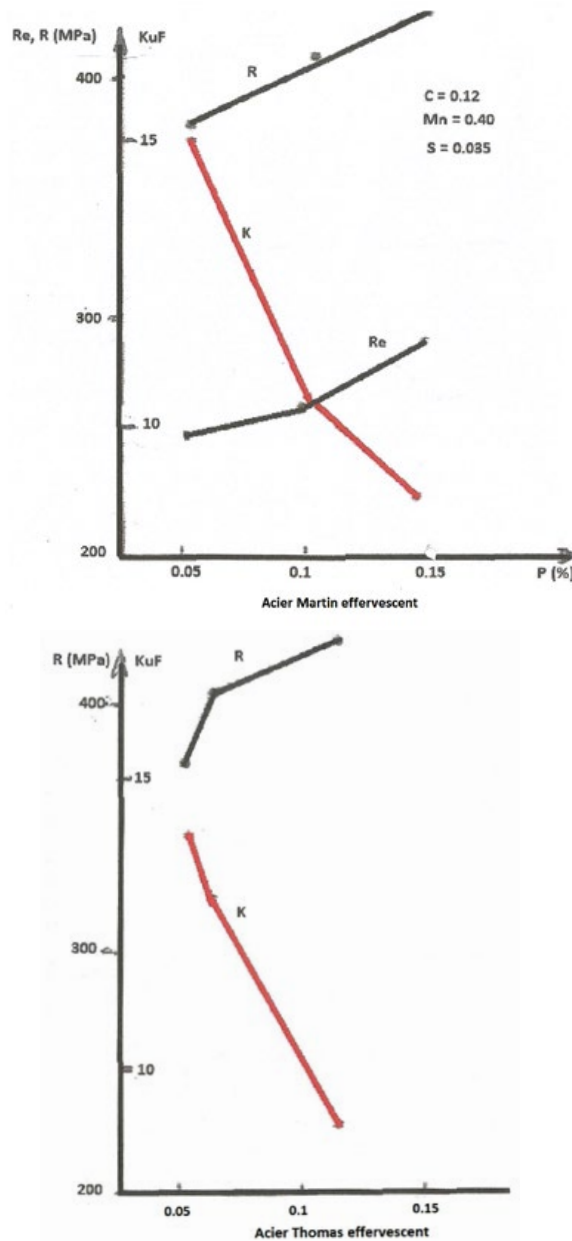


Fig. 13 : Influence du phosphore sur les caractéristiques des aciers doux - selon Soudure Autogène (1937) (bibliographie [21] et [5]).

L'effet de ces constituants justifie la plus grande prudence avant d'engager une réparation sur métaux anciens et d'effectuer les caractérisations nécessaires à la connaissance des matériaux employés.

1.1.3.4 Aciers modernes

Les « Aciers modernes » correspondent aux aciers soudables dont les nuances ont fait l'objet de normalisation selon NF A 35-501 Aciers de construction d'usage général de 1973. Ils sont généralement élaborés par les procédés à l'oxygène et les nuances obtenues ne présentent pas de difficultés au soudage.

L'évolution de la production française suivant les différents procédés de fabrication est résumée dans le tableau.

Production	1954		1964		1974		1982	
	en 1 000 t	en %	en 1 000 t	en %	en 1 000 t	en %	en 1 000 t	en %
Thomas	6 314	59,3	10 603	52,6	5 188	19,2	—	—
Oxygène pur	—	—	2 224	11,2	15 793	58,5	14 891	81
Martin	3 397	31,2	5 182	26,2	2 927	10,8	34	—
Électrique	834	7,8	1 677	8,5	3 110	11,5	3 477	19
Autres	82	0,7	94	0,5	5	—	—	—
Total	10 627	100	19 780	100	27 023	100	18 402	100
Coulée continue	—	—	106	0,1	2 747	10,2	10 769	58,5

Tableau II : Production française d'acier selon le procédé d'élaboration.

> Les procédés d'élaboration à l'oxygène, sans apport extérieur de chaleur, dérivent du procédé Bessemer. Après le chargement des matières (chaux, ferrailles et fonte), l'insufflation d'oxygène peut se faire de différentes façons :

- par le bec du convertisseur, à l'aide d'une lance métallique refroidie à l'eau : le fluide est donc soufflé à la surface du bain liquide (procédés LD, OLP, Kaldo) ;
- par les tuyères placées dans le fond du convertisseur : le fluide est alors soufflé à travers la charge liquide (procédés récents OBM, L WS).

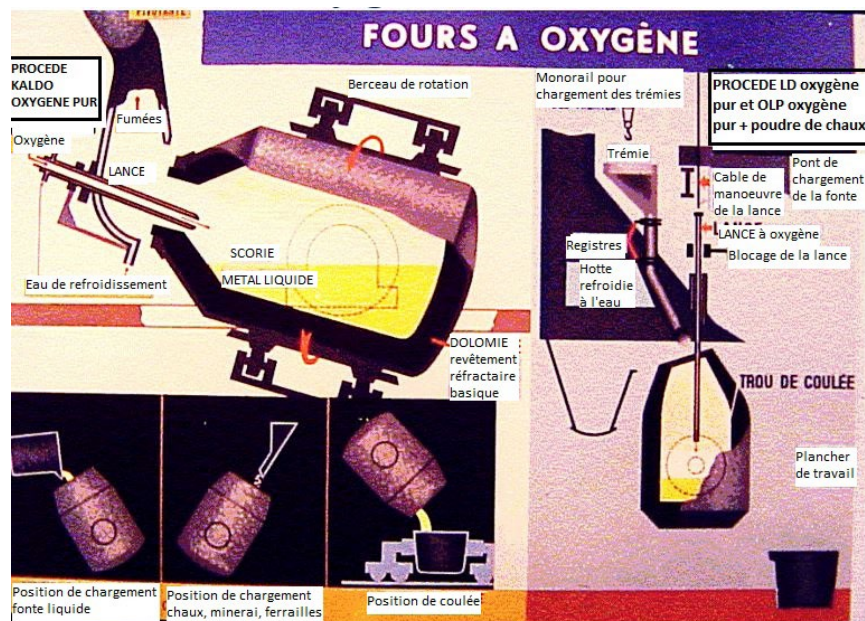


Fig. 14 : Schéma fours à l'oxygène (document OTUA).

1.1.3.4.1 Évolution métallurgique (bibliographie [7])

Les tôles en acier de construction ont longtemps été livrées à l'état normalisé, un état stable obtenu par traitement thermique (recuit effectué après laminage et refroidissement des produits) et dans lequel les caractéristiques du produit sont essentiellement liées à sa composition chimique. Le laminage n'était alors qu'une simple opération de mise en forme permettant d'obtenir les dimensions finales de la tôle.

> Pour augmenter la résistance mécanique des tôles, les sidérurgistes disposaient de deux moyens :

- élever la teneur en carbone et en silicium pour augmenter le durcissement ;
- accroître la trempabilité de l'acier pour obtenir une structure plus fine, en ajoutant par exemple davantage de manganèse.

C'est ainsi que l'on est passé de la nuance E 24 à la nuance E 36 (désignations de la norme) comme le montrent les analyses typiques de tôles d'environ 50 mm d'épaisseur (Tableau III) : C % Mn % Si %

	C %	Mn %	Si %
E 24-4	0,08	1,00	0,20
E 36-4	0,18	1,55	0,45

Tableau III : Évolution de la nuance E 24 à la nuance E 36 [7].

Mais cette évolution s'est faite au détriment de la soudabilité (risque de fissuration à froid) et de la ténacité du métal et il a fallu utiliser d'autres moyens pour modifier les caractéristiques de l'acier.

Dans un premier temps, il a été recherché un durcissement plus efficace que celui dû au seul carbone en utilisant des éléments tels que le niobium ou le vanadium, qui produisent des précipités très fins et qui permettent, à limite d'élasticité identique, d'abaisser la teneur en carbone.

C'est de cette façon qu'ont été mis au point les aciers à haute limite d'élasticité (aciers HLE) de la première génération, aciers micro-alliés ou à dispersoïdes, toujours livrés à l'état normalisé (état N). On est ainsi passé de la nuance E 36 à la nuance E 355 puis aux nuances E 420 et E 460 (respectivement S355N, S420N et S460N selon les nouvelles appellations) avec les analyses moyennes suivantes (Tableau IV) :

	C %	Mn %	Si %	Nb %	V %	Ni %
E 36-4	0,18	1,55	0,45			
E 355 I	0,15	1,50	0,35	0,03		
E 460 I	0,18	1,60	0,40	0,40	0,12	
E 460 II	0,16	1,50	0,30	0,03	0,13	0,60

Tableau IV : Évolution de la nuance E 36 à la nuance E 460 (bibliographie [7]).

La soudabilité de l'acier E 355 était meilleure que celle de l'acier E 36, mais celle de l'acier E 460 était en revanche très médiocre, ce qui explique que cette dernière nuance a été très peu utilisée, du fait des risques de fatigue, malgré le gain de poids qu'elle permettait.

Les sidérurgistes ont exploité dans les années 1980 les possibilités [bibliographie[7]] offertes par des cages de laminoir plus puissantes et, surtout, automatisées et plus rapides et par des dispositifs de refroidissement accéléré pour contrôler le laminage, qui est alors devenu une véritable opération métallurgique conduisant à des structures extrêmement favorables. Ce type de laminage, qui rentre dans la catégorie du laminage contrôlé et qui est appelé laminage thermomécanique, a donné naissance à la deuxième génération d'aciers HLE, celle des aciers S355M à S460M (M désignant l'état thermomécanique) (Tableau V) :

	C %	Mn %	Si %	Nb %	V %	Ni %
S355N	0,15	1,50	0,35	0,03		
S355M	0,09	1,5	0,25	0,03		
S460N	0,18	1,6	0,40	0,03	0,12	
S460M	0,09	1,55	0,30	0,02	0,06	0,25

Tableau V : Évolution de la nuance S355 à la nuance S460 (bibliographie [7]).

Les aciers thermomécaniques (M) présentent des analyses nettement moins chargées que les aciers normalisés (N) de même grade et sont donc beaucoup plus facilement soudables. On peut aussi utiliser le laminage thermomécanique pour obtenir des caractéristiques plus élevées que celles des aciers normalisés de même analyse.

Les aciers thermomécaniques font l'objet d'une publication [bibliographie [8]] de l'OTUA qui présente dans le détail les conditions d'élaboration et d'utilisation de ces aciers.

> Ces aciers ont été utilisés depuis une quinzaine d'année environ. Les premières références sont :

- Le pont de Normandie : utilisation d'acier S420 M partiellement en platelage et d'acier S460 NL pour les oreilles de reprise des haubans.
- Le pont de Remoulins : bipoutre hybride S355 M et ML / S460 M et ML.
- Le viaduc de Millau S460 M et ML (1/3 du tablier).

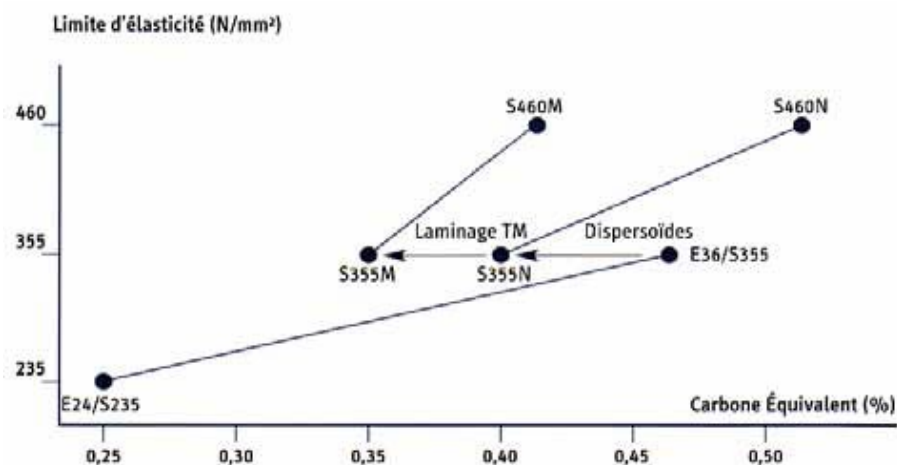


Fig. 15 : Évolution métallurgique des aciers de construction (bibliographie [7]) (valeurs typiques pour des tôles de 50 mm).

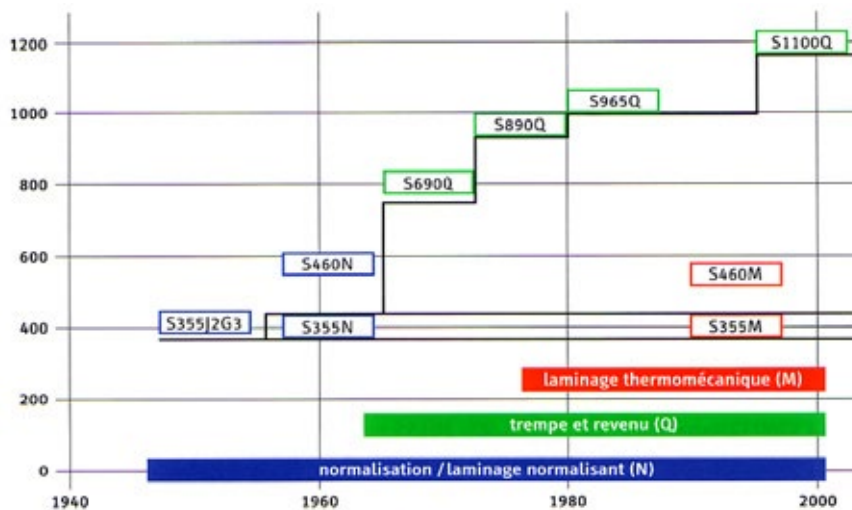


Fig. 16 : Évolution dans le temps des nuances et modes d'élaboration des aciers de construction (bibliographie [7]).

Les aciers trempés et revenus (Q) de caractéristiques élevées ont été peu ou pas utilisés en construction d'ouvrages d'art.

1.1.3.4.2 Cas des aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Les aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique ou autopatinoles s'autoprotègent contre la corrosion par la formation d'une couche d'oxyde à leur surface. Ce sont des aciers qui contiennent un faible pourcentage de cuivre limité à 0.5% et de chrome entre 0.4 et 0.8%. Ils sont plus connus sous leur nom de marque, tel que Corten, Indaten, Diweten.

La protection est réalisée une fois que le produit est exposé, en alternance, à une atmosphère sèche puis humide et qu'une couche brun foncé d'oxyde, qu'on appelle aussi patine, s'est formée. Cette couche d'oxyde est résistante et relativement étanche. Elle constitue donc un frein à la corrosion qui ne peut plus se poursuivre en profondeur.

Toutefois, elle a tendance à s'user et ne fait que ralentir la corrosion. Les pièces en acier patinable doivent être « surdimensionnées » afin de tenir compte de cette perte de matière qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 1 mm ou plus en 50 ans, par face exposée. On peut aussi appliquer une peinture anti-rouille après sablage, notamment sur les parties cachées, ce qui améliore encore la durabilité du matériau.

L'utilisation de ce genre d'acier n'est pas conseillée dans des milieux agressifs et pour des constructions en contact permanent avec de l'eau ou de l'humidité condensée.

Il faut aussi très soigneusement éviter toute possibilité de rétention d'eau qui finirait par provoquer une altération du matériau.

Par ailleurs, la couche protectrice, qui peut durer plusieurs années, s'accompagne d'un dégagement de rouille qui peut salir les parties non ferreuses de la construction. Il conviendra par conséquent de recueillir toutes les eaux de ruissellement qui auront été en contact avec l'acier patinable.

Afin que cet acier ait une teinte uniforme, il est préférable de procéder à un léger sablage des éléments avant leur mise en place. Là encore, il est conseillé de consulter des spécialistes pour la mise en œuvre.

Ces aciers ont fait l'objet de la norme française NFA 35 502 de 1979 modifiée en 1984, remplacé par la norme européenne NF EN 10555 en 1993 puis NF EN 10025-5 en 2004.



Fig. 17 : Ouvrage en acier à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique : pont de Bessège (30) – (photo J. Richard-Ducros).

La circulaire ministérielle n° 81-64 de juillet 1981, dans son annexe VI, a accordé l'agrément à deux usines pour la fourniture de ces aciers sous réserve de restrictions d'emploi.

La note de la Direction des routes du 26 septembre 1985, s'appuyant sur une note d'information du SETRA du 30 avril 1982 [bibliographie [14a]], limite l'utilisation de ces aciers pour les ouvrages d'art aux nuances : E 24 W 3 ; E 24 W 4 ; E 36 W B 4 et introduit la notion de provision d'épaisseur pour tenir compte de la perte d'épaisseur due à la formation de la patine. Les calculs justificatifs des structures doivent être effectués en remplaçant l'épaisseur nominale « t » (mm) des pièces de charpente et des cordons de soudure par une épaisseur fictive conventionnelle.

- « t-2e » (mm) si les deux faces sont en contact avec l'atmosphère
- « t-e » (mm) si une seule face est en contact avec l'atmosphère.

Dans laquelle la valeur « e » est prise égale à :

- 1 mm pour les ouvrages en atmosphère rurale
- 2 mm pour les ouvrages en atmosphère urbaine ou assimilée.

La note d'information du SETRA du 30 avril 1982 [bibliographie [14]] définit en outre des conditions d'emploi et des dispositions constructives adaptées à la spécificité de ces aciers.

Le fascicule 66 révisé en 2012 confirme la non-utilisation en ouvrages d'art de la nuance S355 WP, ce qui élimine cette nuance à teneur en phosphore élevée.

L'utilisation des aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique fait l'objet de la note d'information n°2 -avril 2015 - du CEREMA - IFSTTAR [bibliographie [14b]].

1.1.3.4.3 Cas des aciers moulés

Les aciers moulés ont été utilisés pour la construction de quelques ouvrages, dont le pont Alexandre III inauguré en 1900, et pour des pièces particulières telles que les appareils d'appui métalliques, les selles d'infléchissement et d'épanouissement des câbles de ponts suspendus...

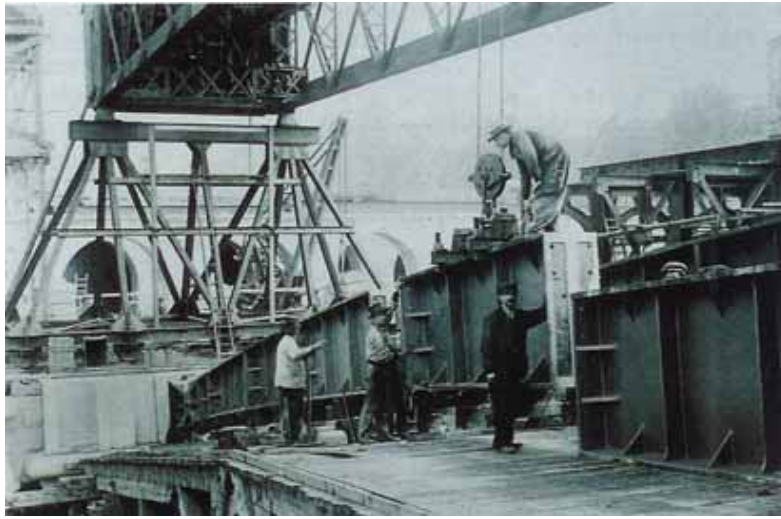


Fig. 18 : Montage des voussoirs en acier moulé du pont Alexandre III (revue Ponts Métallique n°20 - OTUA).

En fonderie d'acier moulé, les pièces sont obtenues directement par solidification du métal liquide dans des empreintes (ou moules) qui reproduisent le plus fidèlement possible les formes et les dimensions finales des pièces. Cette pratique est techniquement et économiquement intéressante, car elle élimine les coûteuses opérations d'usinage ultérieur et elle permet de conserver la peau brute de fonderie qui présente en général une microstructure fine favorable à la bonne tenue des pièces en service.

Les aciers moulés sont caractérisés par une très grande diversité de compositions chimiques. Ils sont constitués d'alliages à base de fer, de carbone, de silicium, de manganèse auxquels peuvent être ajoutés d'autres éléments d'alliages comme le chrome, le nickel, qui leur confèrent des propriétés particulières. La normalisation actuelle définit trois grandes familles d'aciers moulés :

- les aciers au carbone (généralement 0,15 à 0,50 % C) ;
- les aciers faiblement alliés dans lesquels la teneur de chaque élément d'alliage est inférieure à 5 % (Mn, Ni, Cr, Mo, voire V, Cu, Nb...) ;
- les aciers fortement alliés dans lesquels la teneur d'au moins un élément d'alliage dépasse 5 % (Cr, Ni, Mn).

Les pièces en acier moulé moderne sont également aptes aux traitements thermiques qui leur confèrent des caractéristiques mécaniques élevées.

Un texte réglementaire en date du 29 octobre 1913 fixe les caractéristiques de ce type de matériau (bibliographie [2]) :

- limite élastique : 24 kg/mm²
- rupture : 50 kg/mm²
- allongement à la rupture : 12 %

L'utilisation d'acier moulé pour des pièces diverses, telles que : éléments d'appareils d'appui, selles d'inflexion de câbles de ponts suspendus ... peuvent présenter des teneurs en carbone élevées ; toute intervention sur ce type de matériau nécessite une caractérisation métallurgique.

Les aciers moulés étaient précédemment couverts par les normes EN 1559-1 **Fonderie - Conditions techniques de fourniture** - Partie 1 : Généralités et EN 1559-2 **Fonderie - Conditions techniques de fourniture** - Partie 2 : **Spécifications complémentaires pour les pièces moulées en acier**. En 2007 ces normes sont remplacées par une norme spécifique aux aciers moulés pour construction : NF EN 10340.

1.1.3.5 Les évolutions dimensionnelles (bibliographie [7])

Le fonte des premiers ponts métalliques se présentait sous forme de pièces moulées selon les dessins des ingénieurs et des architectes.

Le fer puddlé qui lui succède se présente non plus sous forme d'éléments moulés mais sous forme de plaques, de barres, de profilés, dans des formes et dimensions proposées par les sidérurgistes. La construction devient une combinaison de pièces laminées ou forgées assemblées par boulons ordinaires et, surtout, par rivets. Les dimensions des pièces sont assez faibles. Les tôles réalisables en 1830, par exemple, avaient des épaisseurs comprises entre 3 et 20 millimètres, des largeurs qui ne dépassaient pas 500 millimètres et des longueurs limitées à 1000 millimètres. Dans la construction des ponts, les épaisseurs utilisées sont de l'ordre de 10 - 12 mm.

Avec l'apparition de l'acier, les épaisseurs produites montent à 65 millimètres et les longueurs vont jusqu'à 4 mètres. L'évolution des équipements sidérurgiques et les besoins croissants de l'industrie (chaudronnerie, construction navale) vont ensuite faire progresser très rapidement ces chiffres. Entre 1870 et 1890, toujours sur l'exemple des tôles, les poids passent à 12 puis 30 tonnes et les longueurs à 5 puis 10 mètres, tandis que les épaisseurs et largeurs maximales réalisables s'établissent respectivement à 300/400 mm et 3 mètres.

Des profilés tels que IAO font leur apparition. Ces évolutions se poursuivent au XX^e siècle. Dans la seconde moitié du siècle, les sidérurgistes produisent des tôles hyper-lourdes pour la chaudronnerie. L'amélioration de la soudabilité permet l'utilisation de fortes épaisseurs et, dans les années 1980, l'empilement de semelles n'excédant pas 30 mm en membrure de poutre disparaît au profit de fortes épaisseurs (80 puis jusqu'à 180 - 200 mm).

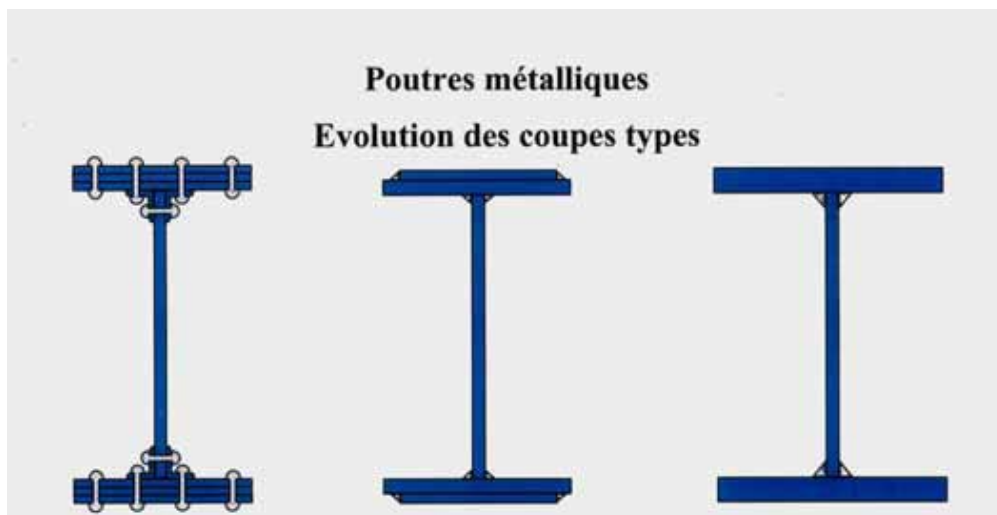


Fig. 19 : Poutres métalliques - Évolution des coupes types (document JP Gourmelon).

Tous ces développements profitent bien sûr indirectement à la construction métallique qui trouve ainsi des produits de dimensions de plus en plus importantes ou des produits présentant des formes nouvelles, comme les tôles profilées en long apparues dans les années 1980.

Les tôles profilées en long sont des tôles dont l'épaisseur varie dans le sens de la longueur et qui, dans les ponts, permettent de mieux se rapprocher du profil idéal théorique dicté par la répartition des moments fléchissants. Parmi les profils réalisables, les plus courants sont les suivants :

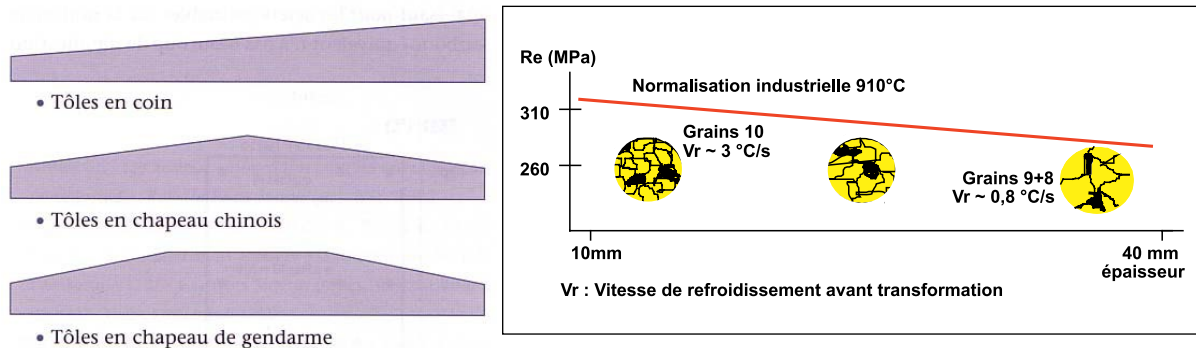


Fig. 20 : Tôles profilées en long (document SACILOR)
 a : différentes formes possibles
 b : caractéristiques et grosseur de grains selon l'épaisseur

Ces produits normalisés selon NF A 36-270 **tôles profilées en long** présentent des caractéristiques mécaniques qui varient selon l'épaisseur.

L'OTUA regroupe sur son site Internet diverses informations sur les caractéristiques de profilés anciens et modernes qui peuvent être consultées dans le cadre d'un recalcul d'ouvrage.

1.2.1 RAPPEL DES RÈGLEMENTS ET NORMES (EXTRAITS DE BIBLIOGRAPHIE [1] – [2] – [3])

1.2.1.1 Les règlements

La liste des règlements et normes « aciers » est reproduite en annexe 1 (bibliographie [3]).

Les règlements de calculs (bibliographie [1] et [2]), dont le premier pour les ponts-rails date du 26 février 1858, définissent les hypothèses de chargement et les contraintes admissibles pour les différents matériaux. La liste des règlements de calcul des ponts métalliques faisant l'objet de l'article de Messieurs Jacques Roche et Joël Raoul dans la revue Ponts Métalliques n° 20 de l'OTUA, est donnée en annexe 3.

Le tableau VI regroupe les contraintes admissibles pour les matériaux métalliques par les différents règlements de calcul jusqu'en 1960.

Contraintes en kg/mm ²	Fonte				Fer puddlé	Acier
	T	C	TF	CF	T-C	T-C
Règlement du 15/06/1869	1	5			6	
Règlement du 9/07/1877	1,5	5	3	5	6	
Règlement du 29/08/1891	1,5	6	2,5	6	6,5 ou 8,5	8,5 ou 11,5
Règlement du 8/01/1915	0	7 ou 6,5	0	7 ou 6,5		8 à 13,5
Règlement du 10/05/1927		7 ou 8	1,5			13 ou 14
Circulaire du 7/02/1933						Ac 42 Ac 54
Règlement du 19/08/1960					Traction Compression	3/4 N 2/3 N

T : traction – C : compression – TF : traction/flexion – CF : compression/flexion

Tableau VI : Synthèse des règlements de calcul – Contraintes admissibles (valeurs exprimées en kg/mm²).

Le fer puddlé disparaît dans le règlement de 1915 ; en fait la coupure fer puddlé – acier, dans le domaine des Ouvrages d'Art, s'est réalisée autour de l'année 1900.

Pour la première fois, un texte réglementaire, en date du 29 octobre 1913, fixe les caractéristiques des matériaux (bibliographie [2]). Précédemment, le règlement de 1891 spécifiait certaines caractéristiques de matériaux, uniquement pour les ponts-rails.

Caractéristiques des matériaux anciens [2]						
texte	produit		limite élastique	rupture	Allongement	Remarque
			kg/mm ²	kg/mm ²	%	
Règlement de 1891	Fer	profilé		32	8	spécifications pour les ponts rails uniquement
		tôle (sens de laminage)		32	8	
		tôle (sens [⊥])		28	3,5	
	Acier	Acier laminé		42	22	
	Rivets	en fer		36	16	
en acier			38	28		
Règl. de 1913	Acier	moulé	24	50	12	
		laminé (tôles, profilés)	24	42	25	
	Rivets		20	38	28	

Tableau VII : Caractéristiques des matériaux anciens (règlements 1891 et 1913).

Le Cahier des charges général de 1956 est un document complet qui couvre l'ensemble des travaux.

> **En examinant plus particulièrement les articles relatifs aux aciers laminés, on peut noter les points suivants (bibliographie [3]) :**

- on distingue deux nuances d'aciers, Ac 42 et Ac 54 ; ces derniers, qualifiés d'aciers à haute résistance, doivent présenter une teneur en cuivre au moins égale à 0,25 % ;
- on distingue les aciers Thomas et les aciers Martin vis-à-vis de l'essai de pliage ;
- l'épaisseur maximale des produits est de 60 mm ;
- les aciers sont soumis à des essais de flexion par choc sur éprouvettes de type UF pour la construction rivée, ces essais sont limités aux aciers Ac 54 ;
- « les aciers destinés à être assemblés par soudure électrique sont, soit des aciers Ac 42 Martin, soit des aciers Ac 54 Martin au chrome et au cuivre (avec une note: Lorsqu'il s'agira de charpentes métalliques autres que les ponts, on pourra employer l'acier Ac 42 Thomas). »

Le choix de l'acier Martin pour l'utilisation en ouvrages d'art est ancien (par exemple cet acier a été spécifié pour la construction des ouvrages aériens du métro de Paris dès 1900). Toutefois il n'est pas exclu de rencontrer des aciers d'élaboration Thomas pour d'autres gestionnaires d'ouvrages.

Le premier fascicule 4 titre III, applicable aux travaux relevant des services des ponts et chaussées, paraît en 1962 et prévoit deux nuances d'acier, A 42 et A 52 pour les constructions rivées, tandis que pour les constructions soudées, deux nuances A 42 S et A 52 S sont assorties de trois qualités : 2, 3 et 4 pour les aciers A 42 S, et α , β et γ pour les aciers A 52 S.

Comme dans le Cahier des charges général, les caractéristiques chimiques et mécaniques sont entièrement définies et la règle est que « tout acier de construction donnera lieu à recette ». Par ailleurs, un arrêté ministériel précise que « les marques d'aciers soudables A 42 S qualité 4 et A 52 S devront préalablement à leur emploi dans les travaux dépendant de l'administration des Ponts et Chaussées, être agréées par le ministre des travaux publics et des transports ». On remarquera que ces dispositions ne visent que les aciers pour constructions soudées.

La parution, en septembre 1965, d'un nouveau fascicule 4 titre III, est interministérielle cette fois, c'est-à-dire applicable aux travaux des différentes administrations. Ce fascicule introduit quelques novations. En octobre 1966, il est diffusé pour application aux travaux relevant de l'administration des ponts et chaussées... Il est spécifié dans la note d'envoi que, bien que le fascicule envisage l'emploi de nuances d'acier normalisées, seules celles définies conformément à l'ancien fascicule doivent être utilisées normalement pour les ouvrages d'art.

« C'est pour éviter toute confusion avec certaines qualités normalisées que les qualités d'aciers soudables A 42 S, précédemment dénommées 2, 3 et 4, s'appellent maintenant qualités 21, 31 et 41 ». Un commentaire à l'article relatif au choix des aciers ajoute même : « Conformément aux errements habituels, les aciers pour garde-corps, joints de chaussées, gargouilles pourront être des métaux du commerce ».

> **L'analyse des spécifications permet de dégager les points suivants :**

- l'épaisseur maximale des produits est de 50 millimètres ;
- les aciers pour construction rivée sont soumis à des essais de résilience KCU à + 20°C ; seules sont fixées les teneurs maximales en soufre (0,06 %) et en phosphore (0,07 %) ;
- les aciers pour construction soudée sont soumis, suivant leur qualité, à des essais de résilience KCU à + 20°C, KCV à 0° ou - 20°C ; la teneur maximale en carbone (0,20 %) est fixée pour les aciers A 42 S ainsi que celles en C (0,22 %), Mn (1,50 %) et Si (0,55 %) pour les aciers A 52 S, avec un maximum uniforme de 0,05 % pour le soufre et le phosphore ;
- les aciers A 42 S α , A 52 S α , β et γ doivent être préalablement agréés par l'Administration.

Une deuxième étape va être franchie avec la mise en révision du fascicule 4 titre III, qui sera diffusé en août 1975. Une étroite coopération s'instaure entre l'Administration, l'AFNOR et les professionnels intéressés, sidérurgistes et entreprises de construction métallique. Il en résulte un texte basé essentiellement sur les normes AFNOR.

Le principe de l'agrément, assorti de la vérification du contrôle en usine, est maintenu. Cet agrément sera géré par la Commission permanente d'agrément et de contrôle des aciers soudables, plus connue sous son acronyme de CIPACAS, instituée en 1962.

> **La soudabilité, point important de l'agrément des aciers se caractérise par deux propriétés :**

- la résistance à la fissuration à froid ;
- la résistance à la rupture fragile.

Celles-ci bornent en fait le domaine de la soudabilité d'un acier, la première vers le bas, dans le domaine des faibles énergies de soudage, la seconde vers le haut, dans celui des fortes énergies. Pour la première, l'essai de référence est l'essai de fissuration à froid sur implants, complété, pour les aciers à plus haute limite d'élasticité, par le diagramme de transformation continue en conditions de soudage (diagramme TRC-S). Pour la seconde, la courbe résilience-température, dite « courbe de transition » est jugée représentative. Début 1979, la procédure est approuvée et mise en vigueur.

En 1976, le code des marchés publics, modifié par le décret n° 76-88, indique que les prescriptions techniques applicables aux marchés de l'État font désormais l'objet de cahiers des clauses techniques générales (CCTG), les fascicules du Cahier des prescriptions communes (CPC) restant en vigueur pour autant qu'ils n'aient pas été remplacés par des fascicules du CCTG. Le principe général étant le recours aux normes. La mise en révision du fascicule 4 titre III n'intervient qu'en 1995. Il sera publié en juin 2000.

1.2.1.2 Les normes françaises

1.2.1.2.1 Les aciers de construction d'usage général (extrait de bibliographie [3])

En 1973, lors de la mise en révision du fascicule du CPC, la norme de référence pour les aciers de construction est la norme NF A 35-501 **Aciers de construction d'usage général**. Sur des principes de base établis en 1968, elle comporte quatre nuances d'acier : E 24 (A 37), E 26 (A 42), E 30 (A 47) et E 36 (A 52), complétées par les nuances A 33, A 34, A 50, A 60 et A 70, utilisables principalement en mécano-soudage. Quatre qualités sont définies, 1 à 4, selon que la résilience n'est pas garantie, ou garantie à l'ambiante, à 0°C ou - 20°C. Toutes ces nuances et qualités correspondent à des aciers au carbone et manganèse, sans éléments d'alliages, obtenus par les procédés Thomas, Martin ou à l'oxygène, la coulée étant effectuée en lingotières. Les épaisseurs maximales considérées sont de 50 mm.

Une première révision a lieu en 1970, abaissant les teneurs maximales en soufre et phosphore et subdivisant la nuance E 36 en deux : E 36 A, sans changement par rapport à la définition précédente et E 36 B, comportant des additions de dispersoïdes (niobium et vanadium) qui favorisent la soudabilité par abaissement de la teneur en carbone. Simultanément, les épaisseurs maximales sont portées à 150 millimètres.

La révision du fascicule 4 titre III est l'occasion de remettre le métier sur l'ouvrage, d'autant qu'une norme expérimentale A 36-201 **Tôles en aciers soudables à haute limite d'élasticité**, sur laquelle nous reviendrons, a été publiée en 1972. La version de juillet 1973 ne comprend donc plus qu'une seule nuance E 36, au carbone et manganèse, la nuance à dispersoïdes étant incorporée dans la norme ci-dessus. Elle définit, en outre des caractéristiques mécaniques pour tôles minces.

Cette norme NF A 35-501 subit plusieurs aménagements tels que l'introduction de la notion de contrôle spécifique ou non spécifique, de l'aptitude au profilage à froid ou la définition des domaines de soudage à l'aide d'abaques, mais la transformation la plus importante se situe en 1981.

À cette époque, les procédés Thomas et Martin ont disparu au profit de l'aciérie à l'oxygène et de la filière à l'arc électrique ; la coulée continue a été introduite et représente 50% de la production ; l'acier effervescent disparaît. L'évolution technique entraîne l'évolution normative, dans le sens d'une amélioration des produits. Ainsi, les qualités 1 disparaissent, les teneurs en carbone sont améliorées et les teneurs en soufre et phosphore de nouveau abaissées. Par ailleurs, la gamme des nuances est simplifiée avec la suppression des nuances E 26 et E 30 au profit d'une nuance intermédiaire E 28.

1.2.1.2.2 Les aciers à haute limite d'élasticité pour constructions soudées

(extrait de bibliographie [3])

Bien que présentant une moins longue histoire que la précédente, la norme NF A 36-201 est plus complexe. Les aciers qui la constituent doivent pouvoir être soudés dans de bonnes conditions économiques et de sécurité, tout en présentant des caractéristiques mécaniques élevées. Ils ont, à l'origine, vocation à être utilisés aussi bien dans le domaine des constructions métalliques que dans celui des appareils à pression, ce qui implique des conditions de service notablement différentes. Il s'ensuit un éventail assez large de compositions chimiques, de nuances et de qualités.

Telle qu'elle est publiée en annexe au fascicule 4 titre III, la NF A 36-201 **Tôles en aciers soudables à haute limite d'élasticité** comporte trois types de composition chimique, quatre nuances, E 355, E 375, E 420 et E 460, et trois qualités, R, C et FP, les deux premières ayant une garantie de résilience à -20°C, la troisième à -50°C. Seules les qualités R et FP sont susceptibles d'utilisation en construction métallique, la qualité C présentant la particularité de garanties de limite d'élasticité à température élevée.

> **Sur le plan de la composition chimique, ces aciers sont caractérisés par une teneur en carbone modérée compte tenu de leurs caractéristiques mécaniques ; ils sont tous calmés au silicium. Les trois types répertoriés sont :**

- les aciers au niobium (E 355, E 375) ;
- les aciers au niobium et vanadium (E 355, E 375, E 420, E 460) ;
- les aciers au chrome, nickel, molybdène et cuivre (E 355, E 375, E 420, E 460).

L'état de livraison étant l'état normalisé ou normalisé et revenu, ces éléments d'addition ont pour objectif d'affiner le grain et de produire un durcissement structural.

On peut noter que cette norme n'envisage pas, sauf accord particulier, de nuances d'aciers obtenus par laminage thermomécanique. C'est sans doute ce qui explique pourquoi l'utilisation des aciers de cette norme se limitera essentiellement à la nuance E 355.

Les épaisseurs couvertes vont jusqu'à 100 mm pour la nuance E 355, 50 mm pour les autres. Cette dernière limite est portée à 80 mm lors de la révision de 1979 qui simplifie la norme en supprimant la qualité C et en ne conservant que deux types de composition chimique.

Enfin, dernière étape avant l'Europe, la révision de 1984 réduit encore le nombre de types de composition chimique, diminue les teneurs maximales en éléments résiduels (Cr, Mo, Ni, Cu) et augmente la gamme d'épaisseurs à 150 mm pour la nuance E 355 et à 100 mm pour les autres nuances. Par ailleurs, des garanties de résilience au tiers ou au quart de l'épaisseur sont obtenues pour être compatibles avec les conditions prévues dans les normes de qualification des modes opératoires de soudage.

1.2.1.2.3 Les autres aciers (extrait de bibliographie [3])

Les aciers dits « autopatinables » sont normalisés en 1979 - NF A 35-502 **Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique**, présentant deux nuances, E 24 W et E 36 W, trois qualités, 2, 3, et 4, et deux types de composition chimique, selon la plus ou moins forte teneur en phosphore. Les épaisseurs couvertes vont jusqu'à 80 mm et la norme inclut quelques recommandations de mise en œuvre. La norme ne subit d'autre transformation qu'un changement de statut en 1984 pour passer de celui de norme enregistrée à celui de norme homologuée.

Les aciers thermomécaniques, d'élaboration récente, n'apparaissent que dans la norme européenne NF EN 10113-3 de 1993, maintenant regroupée dans la norme NF EN 10025. Ils font l'objet d'un document spécifique de l'OTUA (bibliographie [8]).

Les aciers trempés et revenus, peu ou pas utilisés en construction d'ouvrages d'art, mais davantage pour des structures telles que les plate-formes offshore, font l'objet en 1976 de la norme NF A 36-204 prévoyant quatre nuances, E 500, E 550, E 620 et E 690. Le manque d'intérêt pour les aciers les plus résistants de la NF A 36-201 conduit, en 1983, à introduire dans cette norme les deux nuances E 420 et E 460. Les teneurs en carbone sont plus faibles,

favorisant la soudabilité, et les garanties de résilience un peu meilleures. Maintenant décrits dans la partie 6 de NF EN 10025 (ex NF EN 10137), ces aciers sont de plus en plus utilisés en complément des S460 M et ML pour la gamme des épaisseurs supérieures à 80 mm, voire même pour des épaisseurs beaucoup plus faibles lorsque le fournisseur a une faisabilité en épaisseur plus faible en S460M ou ML. Des nuances S690 Q, QL, QL1 pourraient même être utilisées dans un futur proche car désormais autorisées par les Eurocodes.

1.2.1.3 Les normes européennes

Les produits laminés à chaud en acier de construction ont été regroupés en une seule norme NF EN 10025 de mars 2005 qui constitue une révision des normes européennes de NF EN 10025 de 1990, NF EN 10113 de 1993 et NF EN 10155 de 1993. Elle comporte :

- NF EN 10025-1 : **conditions générales de livraison** ;
- NF EN 10025-2 : **conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés**. Cette partie de la norme reprend, avec la partie 1, la NF EN 10025 de décembre 1993 qui, elle-même, constitue une réédition de la NF EN 10025 d'octobre 1990. Cette dernière version comporte trois nuances d'acier : S235, S275, et S355 déclinées en trois qualités : JR, JO et J2 (soit une énergie de rupture en flexion par choc KV de 27 joules, respectivement à 20, 0, et -20°C). Les épaisseurs couvertes atteignent 250 mm pour les produits long et 400 mm pour les produits plats ;
- NF EN 10025-3 : **conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé / laminage normalisé**. Avec les parties 1 et 4, elle remplace la norme homologuée NF EN 10113-1 de juin 1993 et, avec la partie 1, la norme homologuée NF EN 10113-2 de juin 1993, laquelle a remplacé la norme NF 36-201. L'EN 10025-3 comporte quatre nuances S275, S355, S420 et S460 déclinées en deux qualités N et NL selon que les valeurs d'énergie de rupture en flexion par choc sont garanties jusqu'à - 20 ou - 50°C ;
- NF EN 10025-4 : **conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins obtenus par laminage thermomécanique**. Avec les parties 1 et 3, elle remplace la norme homologuée NF EN 10113-1 de juin 1993 et avec la partie 1, la norme NF EN 10113-3 de juin 1993. L'EN 10025-4 comporte quatre nuances S275, S355, S420 et S460 déclinées en deux qualités M et ML selon que les valeurs d'énergie de rupture en flexion par choc sont garanties jusqu'à - 20 ou - 50°C ;
- NF EN 10025-5 : **conditions techniques de livraison pour les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique**. Avec la partie 1, elle remplace la norme homologuée NF EN 10155, d'août 1993 ;
- NF EN 10025-6 : **conditions techniques de livraison des produits plats de construction à haute limite d'élasticité à l'état trempé et revenu**.

1.3.1 DÉFAUTS RENCONTRÉS SUR MATÉRIAUX MÉTALLIQUES ANCIENS

Rappelons pour les fontes les faibles caractéristiques en traction et pour le fer puddlé, l'anisotropie des caractéristiques de ductilité et l'état inclusionnaire nocif vis-à-vis de procédés d'assemblage par soudage. Pour les aciers, d'une façon générale, les défauts cités ci-après peuvent se rencontrer sur des matériaux antérieurs aux années 1975 – 1980 et sont liés aux modes d'élaboration de l'époque.

- **La soudabilité** : la soudabilité des matériaux métalliques employés dans la construction des ouvrages d'art n'a fait l'objet de prescriptions qu'avec l'emploi de la soudure comme mode de réalisation des assemblages. En conséquence, tout ouvrage rivet, mais aussi soudé (antérieur à 1970 env.) doit faire l'objet d'une étude métallurgique de caractérisation de ce critère. La figure 21 présente la rupture d'une diagonale tendue de poutre triangulée sous l'effet d'une soudure de faible dimension destinée à solidariser un garde corps à la diagonale. Cette disposition a entraîné la rupture de la pièce par effet de trempes locale avec formation de structures métallographiques fragiles, la formation d'une fissure puis la rupture de la pièce.
- **La fragilité aux chocs** : les aciers anciens généralement non soudables sont sensibles aux chocs et présentent des ruptures en pleine tôle par manque de déformation plastique.



Fig. 21 : Rupture d'une diagonale tendue sur un point de soudure (photo Jean-Paul PERSY).

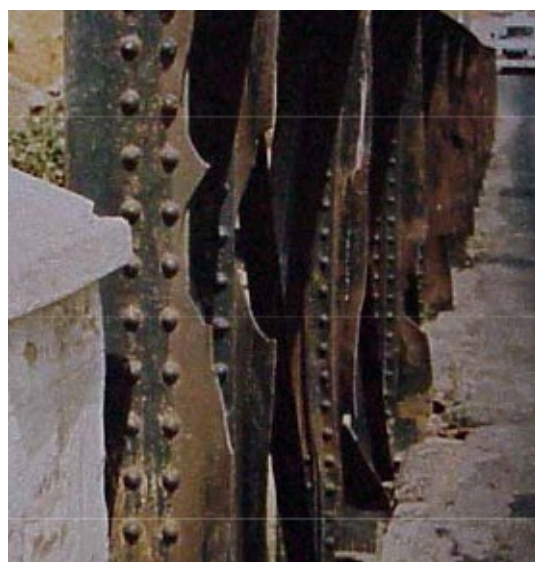


Fig. 22 : Fragilité au choc sur acier des années 1920 env. (photo Jean-Paul PERSY).

■ L'état inclusionnaire :

Les inclusions dans l'acier sont :

- les oxydes
- les aluminates
- les silicates
- les sulfures

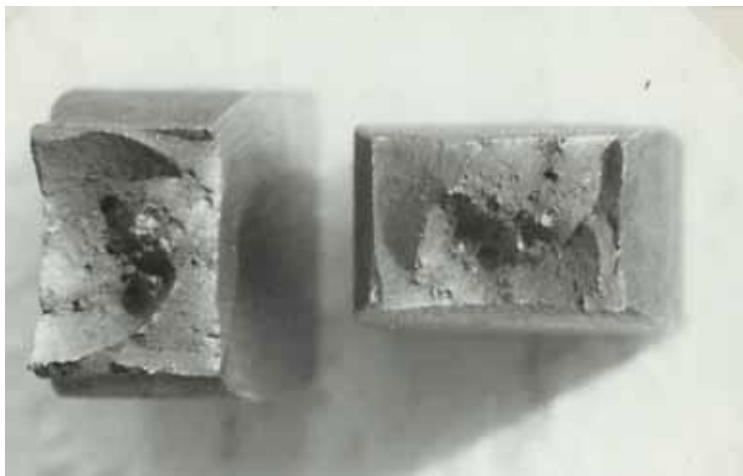


Fig. 23 : Inclusions sur zone de rupture d'une éprouvette de traction : Acier A 52 S γ ~ 1970 (photo Jean-Paul PERSY).

Les deux premières de type globulaire sont peu nocifs au soudage, les deux autres de type allongé génèrent des concentrations de contraintes en extrémité d'inclusions et peuvent initier des fissures à froid qui, par la suite, peuvent se développer sous effet de fatigue.

- **Les soufflures profondes :** l'effervescence des aciers ou un calmage insuffisant entraîne la formation de porosités dont les surfaces oxydées ne sont pas refermées lors du laminage. Ce défaut affaiblit le matériau principalement dans le sens de l'épaisseur (travers court)



Fig. 24 : Porosité dans la masse d'un acier des années 1970 env. (photo Jean-Paul PERSY).

- **Dédoubleures** : les dédoubleures correspondent à la présence d'une retassure secondaire lors de la solidification du métal dans le lingot ou d'un chutage insuffisant en tête de lingot. Ce défaut a disparu avec le développement de la coulée continue (1975 - 80). La résistance au travers court est sensiblement nulle.

Corrosion foisonnante
au niveau d'une dédoubleure de
la tôle sur ouvrage en service.



Epreuve de traction dédoubleée

Dédoubleure multiple sur un large plat

Fig. 25 : Dédoubleures sur essais de laboratoire et sur ouvrage (photo Jean-Paul PERSY).

Les faces des dédoubleures sont généralement oxydées et peuvent présenter des résidus de scories nocives vis-à-vis des opérations de soudage.

- **Les pailles** : ces défauts de surface correspondent à des repliures lors du laminage dont les faces oxydées forment une discontinuité du métal dans le sens de l'épaisseur.

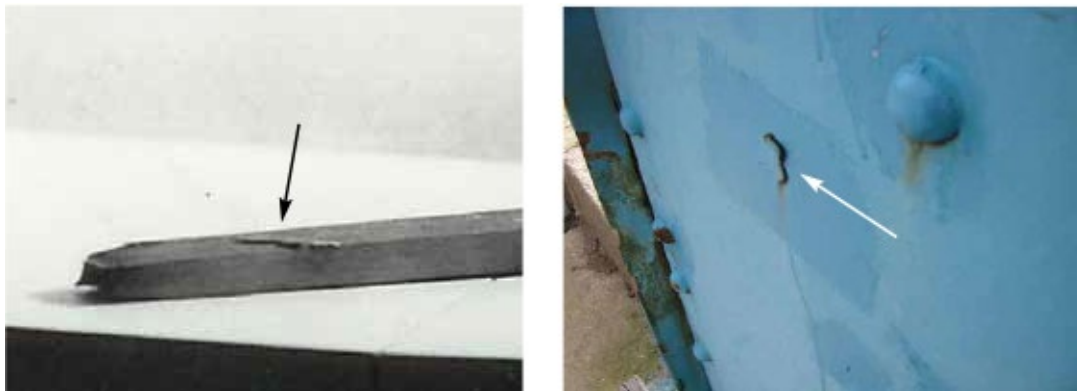


Fig. 26 : Pailles sur éprouvette d'essai et sur ouvrage (photo Jean-Paul PERSY).

1.3.2 DATATION ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

Pour assurer la surveillance, la maintenance et la réparation des ouvrages, le premier point à examiner est la date de construction et des éventuelles réparations réalisées. D'une façon générale ces éléments sont contenus dans le dossier d'ouvrage, mais souvent une reconnaissance et une vérification des caractéristiques mécaniques des matériaux employés s'avèrent nécessaire.

La caractérisation des aciers peut être réalisée par analyse chimique (teneur en carbone, manganèse, silicium, ... teneur en éléments fragilisants...), métallographie (structure, grosseur de grains, état inclusionnaire...), accompagnées, si la dimension des prélèvements le permet, d'essais mécaniques, essais de traction et de résilience.

L'analyse chimique est généralement réalisée au spectromètre à étincelles, ce qui permet une caractérisation rapide des principaux éléments à l'exclusion de l'azote. Ce procédé n'est pas adapté à l'analyse du fer puddlé, car la présence des inclusions peut fausser les résultats. Dans ce cas, une analyse chimique par dissolution sera préférable. L'interprétation des résultats permet de caractériser le matériau (fonte, fer, acier), le mode d'élaboration, la présence d'éléments fragilisants et, pour partie, d'apprécier la soudabilité.

L'examen métallographique complète l'analyse précédente en apportant des éléments sur la grosseur de grains et, par suite, la fragilité, ainsi que sur l'état inclusionnaire des fers puddlés et des aciers anciens. Accompagné d'une mesure de dureté, il permet d'apprécier les caractéristiques et le comportement vis-à-vis de l'assemblage par soudage.

Des prélèvements plus importants permettent de réaliser des essais de traction et/ou de résilience pour une approche précise de ces caractéristiques et l'attribution à une nuance et qualité. Dans le cas de l'étude d'un phénomène particulier, ces prélèvements permettent la réalisation des investigations adaptées.

Les prélèvements sur ouvrage doivent être représentatifs des différentes pièces et la réalisation des prélèvements est une opération délicate qui doit être effectuée en connaissance des efforts auxquels sont soumis les pièces sans prendre le risque d'affaiblissement de la structure. Le prélèvement de certaines pièces constitue une véritable opération de travaux avec un projet de bureau d'étude. Le nombre de pièces prélevé est toujours limité. Ainsi, il est judicieux de multiplier les petits prélèvements en extrémité de pièce pour analyse chimique et examen métallographique. Les structures rivées se prêtent bien à ce type d'analyse. Le prélèvement sur une structure soudée fera toujours l'objet d'une réflexion afin de ne pas générer d'effet d'entaille sur les pièces qui pourrait se développer en fissuration sous effet de fatigue de la structure.



Fig. 27 : Prélèvement en extrémité de pièce pour analyse chimique et examen métallographique (photo Jean-Paul PERSY).

Ces prélèvements en extrémité de pièce par coupe sans échauffement, ou par réalisation de copeaux par perçage permettent les analyses suivantes :

- Analyse chimique des éléments principaux C, Mn, Si, et des impuretés S, P, N. Pour les aciers plus récents, l'analyse des éléments dispersoïdes Nb, V peuvent présenter des compléments d'information. Cette analyse doit permettre d'apprécier le mode d'élaboration et les risques liés à la présence d'impuretés. Pour les fers puddlés, l'analyse par spectromètre à étincelles est déconseillée car la matrice est trop hétérogène, l'analyse par dissolution sera préférée.
- L'examen métallographique permet d'apprécier l'état inclusionnaire du matériau et l'incidence sur la soudabilité.
- La mesure de dureté permet d'apprécier les caractéristiques de résistance du matériau en référence à la norme NF EN ISO 14577 – indice de classement A O3155.

Dans le cas de la possibilité de prélèvements plus importants, il est possible de réaliser des essais mécaniques, essais de traction, de résilience par exemple. Il est souvent difficile de respecter les emplacements de prélèvement d'éprouvettes définis par les normes produits. La présence de ségrégation, d'effet de bord ...doivent être pris en compte dans l'interprétation des résultats par rapport aux normes. Pour un essai de traction, un prélèvement de 150 mm semble un minimum en respectant le sens de prélèvement : sens travers pour les tôles et sens long pour les profilés. Pour les essais de résilience, le prélèvement en sens long est systématique ; les dimensions des éprouvettes normalisées sont la règle.

Ainsi, en fonction du but à atteindre, il apparaît nécessaire de pousser la détermination de la composition chimique au-delà des éléments de base que constituent les éléments C, Mn, Si, S et P.

La caractérisation selon les normes de produits et les besoins d'expertises amène à proposer des analyses avec au minimum les éléments suivants :

Éléments à doser																		
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	Cr	Mo	V	Nb	Sn	Al	As	Ti	Zr	Co	N
Fonte - fer puddlé	x	x	x	x	x													
Aciers anciens et soudabilité	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x				x
Aciers autopatinables	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x			x		x
Aciers modernes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x			x

Tableau VIII : Éléments à doser.

C et Mn interviennent sur les caractéristiques de traction et la soudabilité

N, Cu, Cr, Ni caractérisent les élaborations Martin, Thomas, Oxygène

Si et Al différencient les nuances effervescentes et calmées

Mo, V, Nb caractérisent les aciers à dispersoïdes des années 1970 environ

As caractérise les aciers élaborés à partir de minerai lorrain

Les principales pathologies sur ouvrages métalliques peuvent être regroupées sous les rubriques suivantes :

- La corrosion
- La fragilité
- La fatigue
- La dégradation des assemblages
- Le comportement au feu
-

1.4.1 LA CORROSION

Tout d'abord il convient de fixer une notion de vocabulaire en distinguant : enrouillement et corrosion.

L'enrouillement est une altération de la protection anticorrosion, alors que la corrosion d'une pièce métallique correspond à un stade caractérisé par l'oxydation du métal avec formation de rouille.

L'évaluation de la dégradation des surfaces peintes est établie en référence à la norme NF EN ISO 4628 : « Evaluation de la dégradation des surfaces peintes – Désignation des types courants de défauts », qui se compose de 6 parties.

En inspection d'ouvrages d'art métalliques la partie 3 « détermination du degré d'enrouillement » est prépondérante. Elle définit 6 degrés d'enrouillement : le degré 3 sert généralement de base pour engager une remise en état de la protection anticorrosion.

La vitesse de corrosion dépend de la classification du milieu environnant ; toutefois ces valeurs sont non homogènes et peuvent varier selon l'emplacement.

Le tableau suivant illustre cette classification pour un acier ordinaire.

Corrosivité de l'atmosphère		Vcorr initiale ($\mu\text{m.an}^{-1}$)	Vcorr stationnaire ($\mu\text{m.an}^{-1}$)
C1	très faible	< 1,3	< 0,1
C2	faible	1,3 - 25	0,1 - 1,5
C3	moyenne	25 - 50	1,5 - 6
C4	élevée	50 - 80	6 - 20
C5	très élevée	80 - 200	20 - 90

Tableau IX - Corrosivité de l'atmosphère, selon la norme NF EN ISO 9226, pour l'acier au carbone.

La corrosion est un phénomène électrochimique qui se présente sous forme de piqûres, localisées ou généralisées.

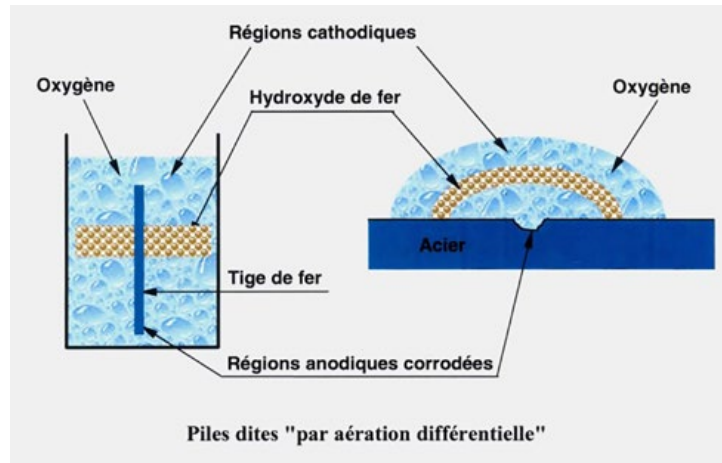


Figure 28 : Piles dites « par aération différentielle » (document JP Gourmelon).

De façon simplifiée, les réactions chimiques de la corrosion sont :

- dans la zone cathodique : $O_2 + 2 H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH)^-$
- dans la zone anodique : $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$
- dans la zone intermédiaire : $Fe^{++} + 2 OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$
- par oxydation ultérieure : $2Fe(OH)_2 + H_2O + 1/2 O_2 \rightarrow 2 Fe(OH)_3$

Il convient de noter que la rouille présente une expansion correspondant à 8 fois le volume de métal dégradé selon les oxydes et hydroxydes formés ; en conséquence, il convient d'apprécier les sections résiduelles de métal sain.

Les facteurs de corrosion sont :

- les dispositions constructives non adaptées
- les pièges à poussières
- les pièges à eau
- les éléments agressifs (ex. atmosphères marines, industrielles...)
- le manque d'entretien

> Les illustrations ci-après présentent quelques cas de corrosion observés sur ouvrages :



Figure 29 : Piège à poussière, maintien de l'humidité, végétation, foyer de corrosion (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 30 : Renforts de membrure inférieure formant piège à eau et / ou piège à poussière (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 31 : Enrouillement, et début de corrosion sur zone condensante en sous-face d'une membrure inférieure de pièce de pont (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 32 : Corrosion feuilletante d'une membrure inférieure d'une poutre d'un pont à poutrelles enrobées (photo Jean-Paul PERSY).

Cet aspect de corrosion peut être la conséquence de la formation de structures métallographiques ferrite – perlite rubanées suite à un laminage à température basse.



Figure 33 : Corrosion feuillettante d'un gousset sur un ouvrage des années 1960 (photo Jean-Paul PERSY).

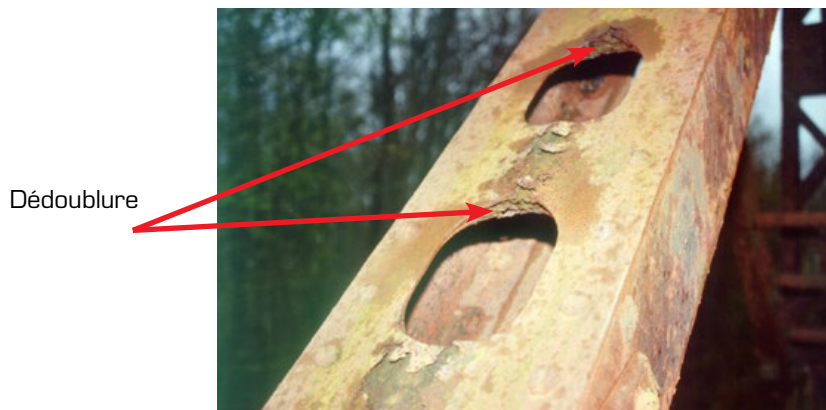


Figure 34 : Corrosion foisonnante sur dédoubleure sur une poutre caisson élégie (photo Jean-Paul PERSY).

Les dédoubleures ont pour origine un chutage insuffisant du lingot lors de l'élaboration de l'acier (chutage : élimination de la tête de lingot où se concentrent les vides et impuretés).

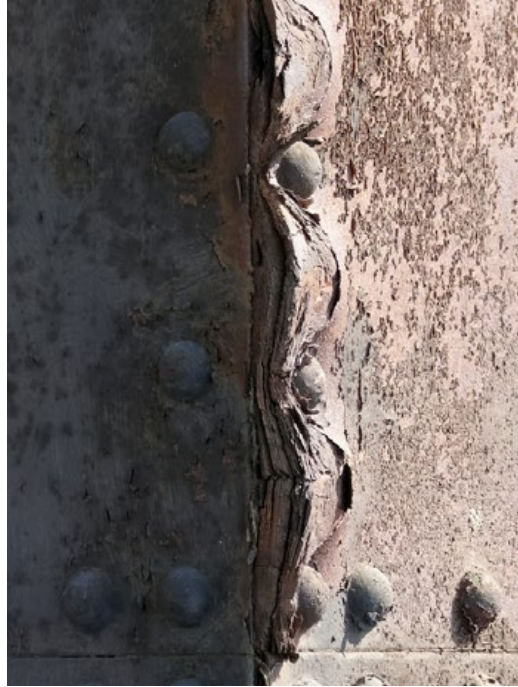


Figure 35 : Corrosion foisonnante entraînant une importante traction sous tête des rivets (photo Jean-Paul PERSY).

La rouille formée peut atteindre 8 fois le volume de métal dégradé.



Figure 36 : Corrosion d'écrous (photo Jean-Paul PERSY).

Les aciers de décolletage peuvent être choisis parmi des nuances resulfurées (ce qui permet la fragmentation des copeaux), qui entraînent une mauvaise tenue à la corrosion. Ici, les écrous ont quasiment disparus par corrosion, alors que les tiges filetées ne sont pas ou peu dégradées.



Figure 37 : Corrosion fissurante sur assemblage boulonné de tige d'ancrage (photo Jean-Paul PERSY).

Une telle fissuration, située sous l'écrou, est indétectable en inspection visuelle d'ouvrage. En conséquence, il est préconisé d'assurer un environnement particulièrement sain autour de tels assemblages (éliminer les stagnations d'eau, et débris divers...). Ces fissures sont généralement localisées au niveau du premier filet porteur, le plus sollicité.

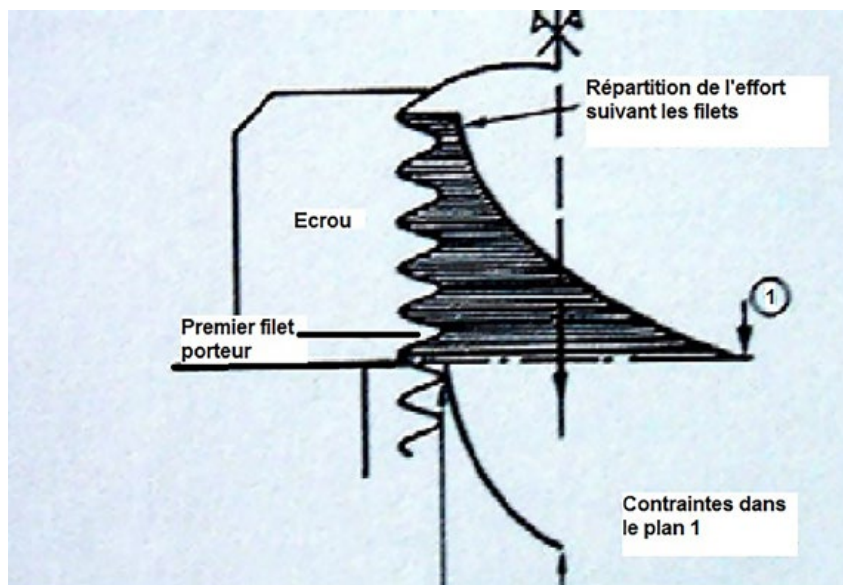


Figure 38 : contraintes dans un assemblage boulon écrou (document CETIM).



Figure 39 : Corrosion des têtes de rivet, risque de perte de résistance à la traction sous tête (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 40 : Dégradation des têtes de rivet par corrosion (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 41 : Membrane inférieure corrodée latéralement, conservée après vérification par calcul et traitement anticorrosion (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 42 : Dégradation, avec écrasement de la zone d'appui d'une poutre encastrée, affaiblissement par corrosion (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 43 : Corrosion de pièce noyée dans la maçonnerie. Perforation de l'âme, corrosion des cornières de membrures au contact de la maçonnerie (photo Jean-Paul PERSY).

> Corrosion entre métaux :

- Les dispositions constructives non adaptées

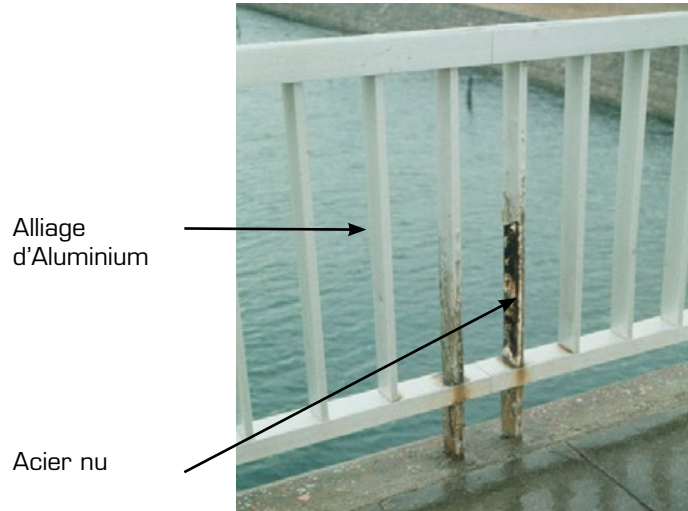
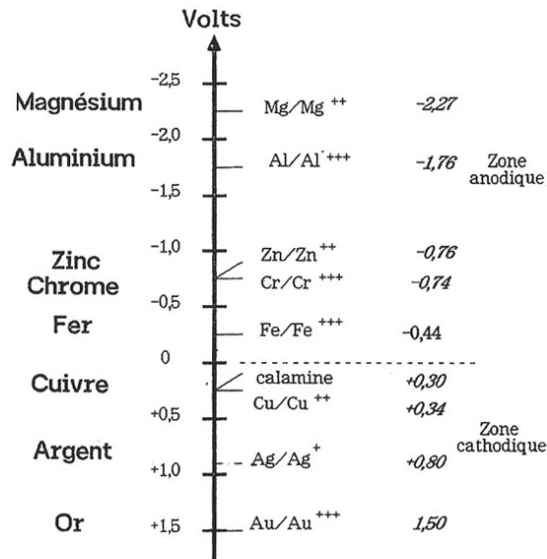


Figure 44 : Corrosion galvanique d'un garde-corps en alliage d'aluminium fixé sur montants « acier » (photo Jean-Paul PERSY).

- En milieu humide et/ou salin formation de couple galvanique entre métaux.



Série des potentiels électrochimiques de quelques métaux (potentiels standards par rapport à l'électrode normale à hydrogène)

Figure 45 : série de potentiels électrochimiques de quelques matériaux (potentiels standards par rapport à l'électrode normale à l'hydrogène).

Les métaux les plus électronégatifs se dégradent au profit des métaux plus « nobles » ; dans le cas précédent du garde-corps, l'aluminium se dégrade au profit de l'acier.

1.4.2 LA FRAGILITÉ

La ductilité et, a contrario, la fragilité d'un matériau dépendent de nombreux paramètres, dont notamment le mode d'élaboration, la température et la vitesse de déformation.

Concernant la température, la plupart des matériaux cristallins sont fragiles à basse température et deviennent ductiles au-dessus d'une certaine température. Cette température est appelée la température de transition fragile-ductile.

En France le cas de rupture fragile le plus spectaculaire a été l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire en janvier 1985.

Cet ouvrage, reconstruit en 1946, était un pont suspendu à câblerie discontinue en tête de pylône.

Il comportait 4 travées d'une centaine de mètres.



Figure 46 : effondrement du pont de Sully-sur-Loire en janvier 1985 (photo Jean-Paul PERSY).

Les câbles étaient reliés aux chariots en tête de pylône et aux ancrages par des étriers en barres filetées. Les suspentes étaient également constituées de barres en acier.

L'effondrement s'est produit le 16 janvier 1985 à 7h40 par une température de l'ordre de -23°C .

Les 4 travées se sont effondrées dans le lit de la Loire, seule la travée de rive gauche est tombée sur la berge.

Les barres en acier de diamètre 56 et 60 mm présentaient des ruptures planes à fond de filetage.



Figure 47 : Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre (photo Jean-Paul PERSY).

Les aciers en barre constituant étriers et suspentes présentaient les compositions chimiques d'aciers durs à teneur en carbone élevée, élaboré par un procédé de type Thomas :

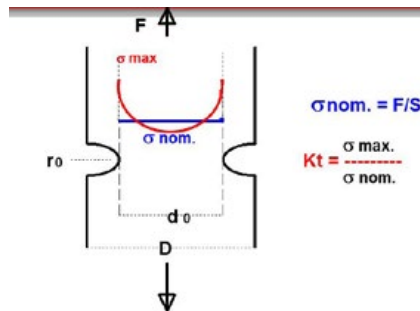
Composition chimique - teneurs en %						
	Carbone	Manganèse	Soufre	Phosphore	Silicium	Azote
Etrier	0,55	0,52	0,035	0,06	0,06	0,014
Suspente	0,39	0,61	0,028	0,045	0,3	0,022

Tableau X : composition chimique - teneur en %

Les examens métallographiques ont mis en évidence des structures ferrite - perlite à grains grossiers (indice 4 - 6) et dureté Vickers élevées (200 à 260 unités Vickers)

Les géométries de filetage, réalisé par usinage, ainsi que les facteurs de concentration de contraintes déduits n'étaient pas très agressifs.

Géométrie de filetage - facteur de concentration de contrainte					
	D mm	H mm	pas mm	r 1/100mm	Kt
Etrier	60	2,7	4,5	60	4,6
Suspente	56	3,4	5,5	140	3,5



Kt : Coeff. de concentration de contrainte

Tableau XI : Géométrie de filetage - facteur de concentration de contrainte.

Essais de résilience en Joules & tenacité				
	température d'essais		tenacité	
	+ 20°C	- 20°C	KIC -20°C	Classe
Etrier	6	3	15	1
Suspente	7	4	19	1

Tableau XII : Essais de résilience en Joules & ténacité.

Le niveau de résilience était très bas et correspondait au domaine fragile de la courbe de transition fragile – ductile des aciers. Dans le cas présent, pour atteindre la température de transition conventionnelle de 27 Joules, il a fallu réaliser des essais de résilience à une température supérieure à 80°C.

> **Température de transition ductile-fragile :**

Si on réalise des essais de traction à basse température, on constate que la limite d'élasticité et la résistance augmentent, alors que l'allongement à rupture, l'allongement réparti et la striction diminuent. A une certaine température, la résistance est égale à la limite d'élasticité ; au-dessous de cette température, l'éprouvette casse à une contrainte appelée contrainte de rupture fragile.

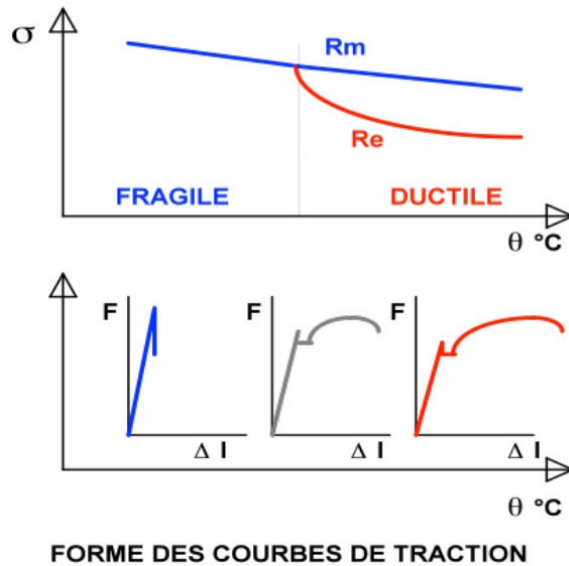


Figure 48 : Forme des courbes de traction en fonction de la température (Biblio OTUA).

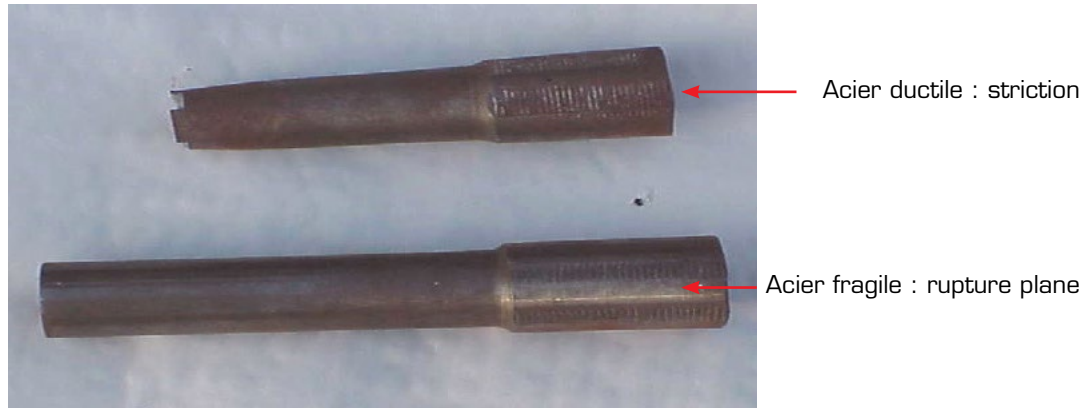


Figure 49 : Exemple d'essais de traction sur acier ductile et fragile (photo Jean-Paul PERSY).

La mécanique de la rupture et les travaux de différents auteurs ont permis l'analyse des phénomènes de fragilité.

L'absence de striction au niveau des cassures en service et la présence de clivages justifiaient l'hypothèse retenue qui considère que la mécanique linéaire élastique de la rupture est applicable. Ce qui permet de corréler ténacité K_{Ic} et résilience KV (travaux de Barsom – Rolfe) :

Les barres filetées présentaient des défauts à l'origine des ruptures en service. Ces défauts étaient, soit les filetages eux-mêmes, soit des fissures dues à des phénomènes de fatigue et/ou de corrosion. Les filetages avaient un rayon de courbure de l'ordre du millimètre et pouvaient être assimilés à des fissures pour cette qualité d'acier. Pour chaque défaut, il a été possible de calculer le facteur d'intensité de contrainte K_I pour une valeur donnée de la contrainte appliquée.

Les ruptures par propagation apparaissent lorsque la température baisse ; la ténacité K_{Ic} du matériau diminue et peut devenir inférieure à la valeur K_I du facteur d'intensité de contrainte du défaut en condition de service ; c'est le domaine de risque de propagation de la rupture fragile (en jaune sur la figure suivante).

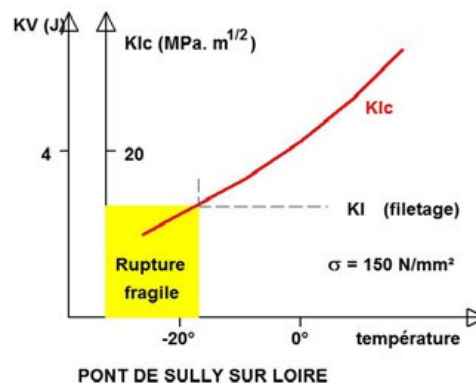


Figure 50 : propagation de la rupture fragile.

L'effondrement du pont de Sully-sur-Loire a entraîné une vaste campagne de vérification des ouvrages analogues afin de se prémunir du risque de rupture fragile ; ces concepts sont, maintenant, introduits dans les règlements de calcul tels que les Eurocodes.

> **Autres exemples de rupture fragile :**



Figure 51 : Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre (photo Jean-Paul PERSY).

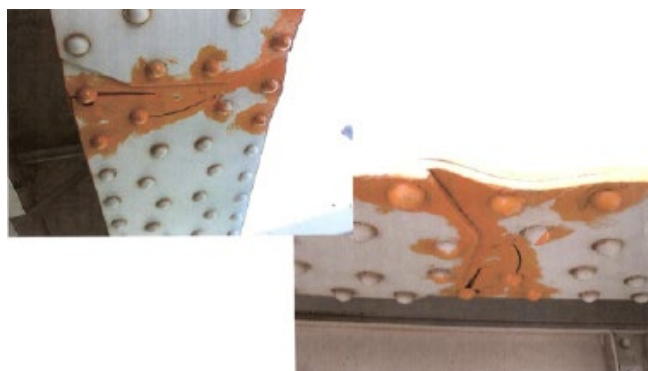


Figure 52 : Fissures, amorces de rupture, suite à un choc de bateau sur acier fragile d'une membrure inférieure de pont (photo CETE Méditerranée).



Figure 53 : Ruptures sur acier fragile par chocs de véhicules – acier des années 1925 environ (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 54 : Choc de véhicule sur un arc en fonte de 1903 (photo Jean-Paul PERSY).

Les phénomènes de fragilité se rencontrent plus particulièrement sur les fontes et les aciers de construction anciens effervescents élaborés selon le procédé Thomas. Les facteurs aggravants étant la composition chimique par la présence d'éléments fragilisants (tels que teneur élevée en carbone, en éléments d'impuretés phosphore et azote), les chocs et les basses températures.

Le soudage de ces aciers est délicat voire impossible.

> Bibliographie :

■ La rupture des aciers – collection IRSID – OTUA (Construire'Acier) :

- La rupture fragile
- La mécanique de la rupture

■ Articles :

- Etude de la rupture par temps froids d'éléments en acier provenant d'un pont suspendu. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 152 novembre - décembre 1987 –JP Persy et A Raharinaivo.
- Effondrement du pont suspendu de Sully-sur-Loire. Bulletin Ponts Métalliques n°13 - OTUA - 1987 – JP Persy.

1.4.3 LA FATIGUE

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue, la modification des propriétés du métal consécutive à des cycles d'effort, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture de la pièce.

La rupture peut se produire pour des contraintes relativement faibles, sans modification apparente de forme ou d'aspect de la pièce. La fissuration progressive est suivie d'une rupture brutale, lorsque la contrainte dans la section résiduelle dépasse celle que peut supporter le métal.

La réglementation sur le sujet est relativement récente :

- 1986 : première recommandation CECM
- 1993 : ENV Eurocode 3 chapitre 9
- 1996 : Guide SETRA – SNCF – CTICM
- 2002 : EN Eurocode 3 partie 1-9 Fatigue

Les détails constructifs ont été classés selon leur résistance en nombre de cycles à variation de contrainte donnée. Ces courbes sont référencées par rapport à la résistance à 2 millions de cycles.

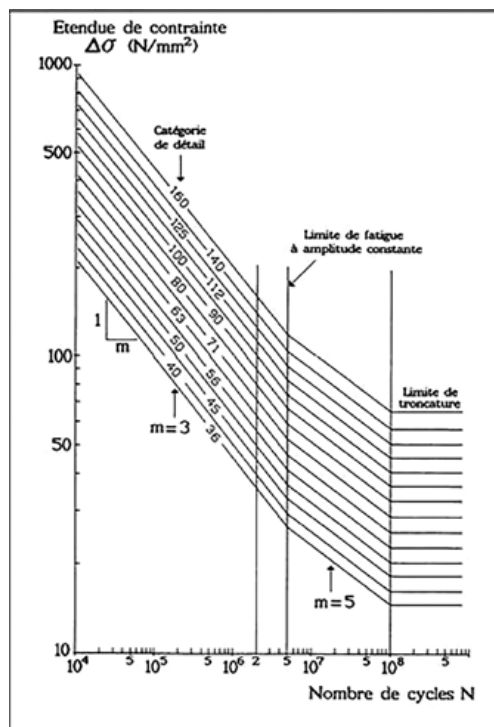


Figure 55 : Familles de courbes de Wöhlér.

Tableau L.2 — Profils reconstitués soudés — feuille 2/2


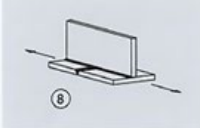
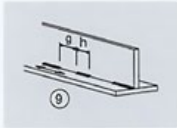

Catégorie de détail	Détails constructifs	Description	Exigences
100		7) Réparation de soudures d'angle ou bout à bout réalisées manuellement ou automatiquement.	7) Des méthodes d'amélioration convenablement contrôlées peuvent restaurer la catégorie d'origine.
80		8) Soudure longitudinale continue croisant une soudure transversale bout à bout.	
80		Soudures longitudinales intermittentes 9) Soudures de pointage ou intermittentes non recouvertes ultérieurement par une soudure continue	9) Soudure d'angle intermittente avec taux d'espacement $g/h \leq 2,5$
100		10) Extrémités de soudures au niveau de découpes en trou de souris.	10) Le trou de souris ne doit pas être rebouché par le métal d'apport.

Tableau XIII : Exemple de classement d'assemblages - extrait Eurocode 3 chapitre 9.

Le document SETRA – SNCF – CTICM présente sous forme synthétique l'influence des dispositions constructives dans le cas des bipoutres mixtes ; les valeurs indiquent les classes de fatigue à respecter pour les différents assemblages.

Le principe de calcul sous un chargement-type (convoi de fatigue) visant une durée vie de 100 ans après N_0 cycles par an, soit 2×10^6 au total, est de s'assurer que, pour chaque détail constructif, l'amplitude de la variation de contraintes développée par les passages répétés (N_0 cycles par an) d'un convoi dit de fatigue, représentant le trafic réel, ne dépasse pas une valeur de référence basée, normalement, sur un nombre total de $2 \cdot 10^6$ cycles sur une période de 100 ans. Bien entendu le calcul des sollicitations et des contraintes limites tient compte de majorations et de minorations par l'intermédiaire de coefficients partiels.

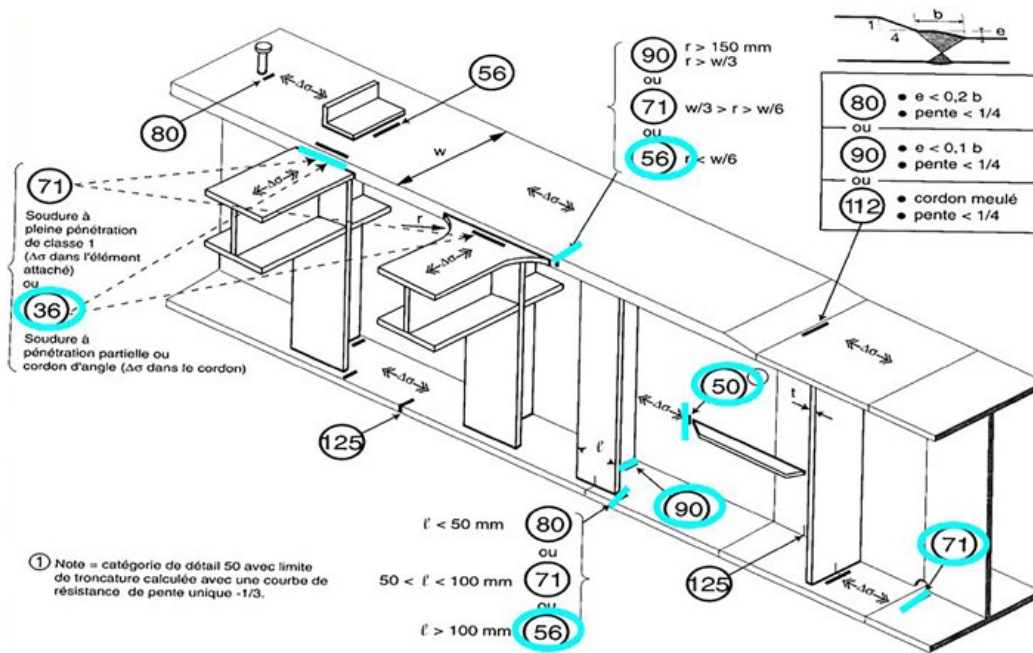


Figure 56 : Catégories de détail des principaux assemblages sans les ponts routiers métalliques et mixtes [bibliographie [19]].

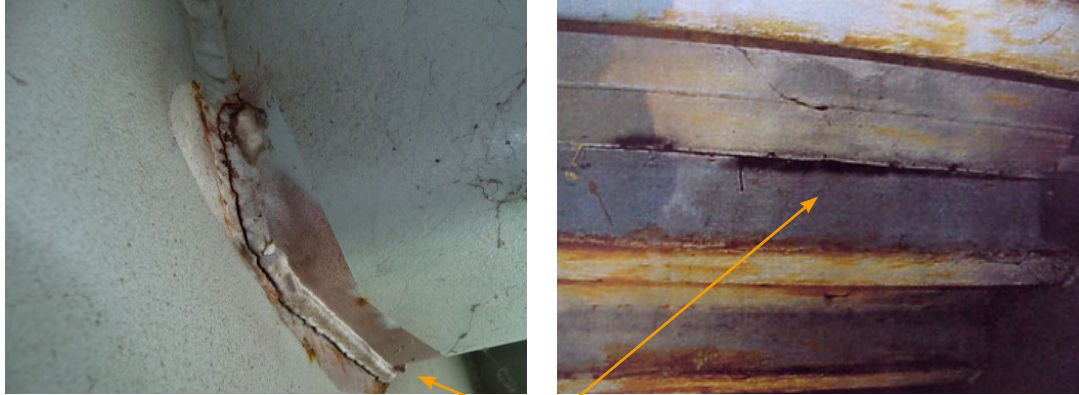
Compte tenu de la réglementation récente de ce phénomène, les ouvrages soudés de construction antérieure à celle-ci sont susceptibles de présenter cette pathologie.

Elle concerne les constructions soudées dont les assemblages présentent des conditions de contraintes internes élevées (bridage des soudures) en plus des sollicitations, mais peut également affecter des pièces présentant des variations géométriques brutales avec ou non découpe formant concentrations de contraintes.

> Les illustrations suivantes présentent des cas de fissuration par fatigue :



Figure 57 : Fissuration par fatigue de tôle de platelage sous l'effet de la circulation - ici platelage de 10 mm sur autoponts (photo Jean-Paul PERSY).



Figures 58 a et b : Fissuration d'augets discontinus au droit des pièces de pont de platelage orthotrope avec prolongement sous platelage (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 59 : Fissure frontale d'une semelle additionnelle de membrure inférieure de poutre (photo Jean-Paul PERSY).

Les dispositions constructives ont évoluées afin de réduire les variations brutales de géométrie :

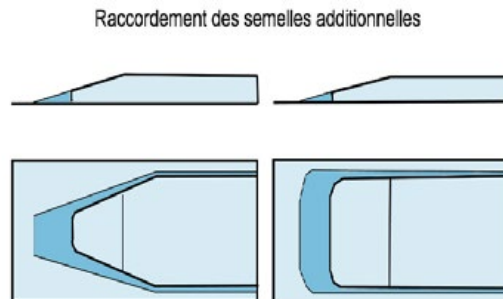


Figure 60 : raccordement des semelles additionnelles recommandé (document Jean-Paul PERSY).

1.4.4 LA PATHOLOGIE DES ASSEMBLAGES RIVÉS

1.4.4.1 Défauts de pose

> Les défauts de pose se détectent par l'examen de la tête seconde sur l'assemblage, ce sont :

- Tête mal pincée
- Tête excentrée

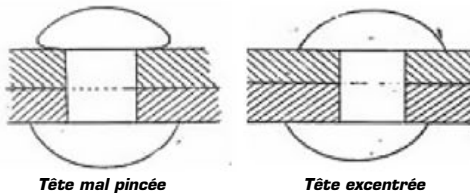


Photo Eiffel

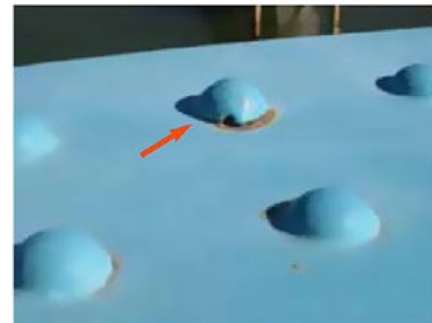


Fig. 61 : Défauts de pose de rivet (document Jean-Paul PERSY).

- Gerçure du métal.
- Tige trop courte : se caractérise par le marquage de la bouterolle autour de la tête de rivet.
- Tige trop longue : se caractérise par une collerette de métal autour de la tête de rivet.

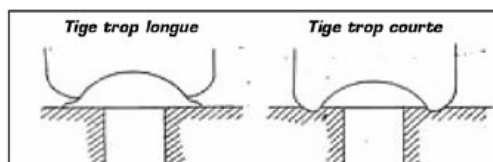


Fig. 62 : Défaut de longueur de tige de rivet.

- Développement de fissures autour du trou, initiées lors de la réalisation du trou.



Fig. 63 : Fissuration sur trou de rivet (Photo SNCF).

1.4.4.2 Corrosion

La corrosion des têtes peut prendre plusieurs aspects en fonction du formage de la tête. Le résultat est la dégradation du métal des têtes avec à court ou moyen terme la déconsolidation de l'assemblage.



Fig. 64 : Corrosion de rivets (photo Jean-Paul PERSY).

1.4.4.3 Déconsolidation des rivets et assemblages

Le desserrage des rivets et assemblages rivés est un phénomène lent de mise en mouvement des pièces les unes par rapport aux autres. C'est surtout un phénomène qui concerne les ponts ferroviaires de conception ancienne et à pose de voie directe (absence de ballast).

> Les déconsolidations sont révélées par :

- La rupture du film de peinture
- Un léger ressuage d'oxyde sur la peinture
- Le mouvement du (des) rivet(s) ou assemblage
- L'ovalisation des trous
- La rupture du (des) rivet(s) ou assemblage



Fig. 65 : Dégradation des rivets (à gauche) et assemblages (à droite) par déconsolidation (photos SNCF).



Figure 66 : Différents stades de déconsolidation d'un assemblage rivé (photo SNCF).

Avec une déconsolidation, les mouvements entraînent un risque d'ovalisation des trous, ce qui nécessite en réparation de procéder à un réalésage au diamètre supérieur. L'ovalisation peut également accompagner l'initiation de fissures.

Sous efforts excessifs, les ruptures peuvent se produire par cisaillement des rivets ou boulons ou par arrachement (dépassement de la résistance en pression diamétrale)



Figure 67 : Effet de cisaillement sur un corps de rivet (photo Jean-Paul PERSY).

1.4.4.4 Rupture des rivets

> La rupture des rivets peut être la conséquence :

- de phénomène de corrosion
- de déconsolidation
- de cisaillement sous effet de chocs, ou d'efforts anormaux
-

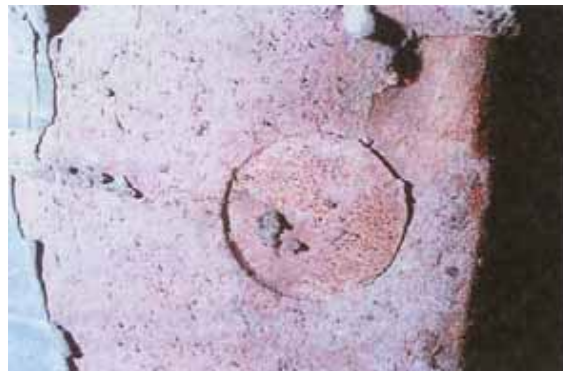


Fig. 68 : Rupture d'un rivet par cisaillement de la tête (photo SNCF).

1.4.5 PATHOLOGIE DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

> Les principales pathologies des assemblages boulonnés sont :

- Les défauts de pose : principalement liés au mauvais dimensionnement et choix des boulons : longueur de tige insuffisante, non respect des conditions de pose.
- La corrosion peut prendre plusieurs aspects, d'abord enrouillement de surface par défaut de protection anticorrosion pouvant aller jusqu'à la dégradation des boulons. La corrosion spécifique des écrous sur ouvrages anciens en boulonnage ordinaire est généralement la conséquence de l'utilisation d'acier resulfurés dans le but d'améliorer l'usinabilité.
- La corrosion entre pièces peut entraîner des efforts de traction sous tête excessif.
- La déconsolidation de boulons ordinaires par suite de serrage insuffisant et/ou de sollicitations répétées excessives se manifeste par le desserrage de boulons qui se propage à l'ensemble des boulons de l'assemblage et engendre le mouvement relatif des pièces et par suite le mauvais transfert des efforts.
- Le glissement des pièces par suite de dépassement de la résistance de l'assemblage sur un assemblage précontraint peut intervenir en conditions extrêmes. L'assemblage est non réparable partiellement, la reprise de l'ensemble (en l'absence de désordres autres) sera nécessaire par remplacement des couples joints, l'élimination de l'ovalisation des percages des tôles à rabouter et l'utilisation de boulons de diamètre supérieur.

La rupture des boulons est décrite dans un article de CETIM- information n° 107 – octobre 1988 (bibliographie [8]). Outre les phénomènes de corrosion, deux types de rupture font l'objet de la majorité des expertises de laboratoire.

- Ruptures brutales, soit fragiles, soit ductiles sous chargement statique ou sous l'effet de chocs.
- Ruptures progressives de fatigue sous sollicitations d'amplitudes variables.



Fig. 69 : Corrosion spécifique des écrous d'une attache basse de suspension de pont suspendu (photo Menou - LCPC).



Fig. 70 : Déconsolidation d'un assemblage boulonné non précontraint d'une poutre treillis avec disparition d'un boulon de l'assemblage (photo Jean-Paul PERSY).

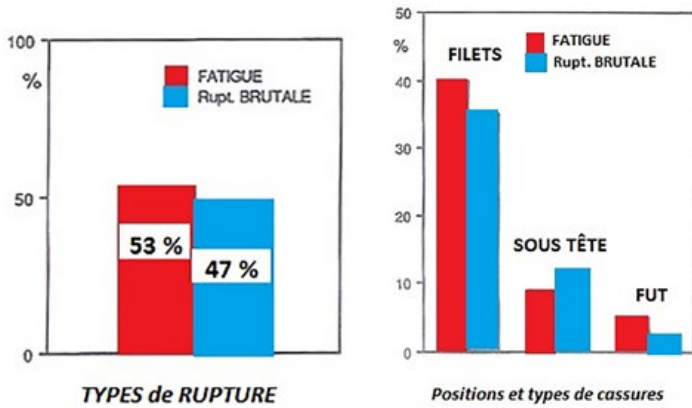


Fig. 72 : Type et position des cassures [CETIM info]



Fig. 71 : Glissement des pièces au niveau d'un joint de rabotage sous effort excessif (effondrement partiel de l'ouvrage). Mise en évidence par rupture du feuil de peinture et mise à nu de la sous couche au minium de plomb (photo Jean-Paul PERSY).



Fig. 73 : Coupe d'un boulon HR galvanisé rompu par fragilisation par l'hydrogène. Rupture sous tête (photo Jean-Paul PERSY).

Les ruptures sous tête ont souvent eu pour cause la fragilisation par l'hydrogène qui avait pour origine la préparation par bain acide du traitement de surface par galvanisation. Ce procédé est maintenant abandonné.



Figure 74 : Rupture par dépassement des efforts en pression diamétrale sur une charpente (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 75 : Sur ouvrage d'art, rupture par dépassement des efforts en pression diamétrale pour l'âme, par excès de traction pour le couvre-joint de la membrure inférieure (photo Jean-Paul PERSY).

Les assemblages boulonnés présentent le phénomène de déconsolidation analogue au cas des assemblages rivés avec les observations localisées à un ou plusieurs boulons ou encore entre les pièces de l'assemblage.

L'évolution du phénomène passe par les stades :

1. La rupture du film de peinture autour du boulon ou de l'assemblage
2. Un léger ressuage d'oxyde sur la peinture
3. Le mouvement de l'élément
4. La rupture d'un ou plusieurs boulons ou de l'assemblage.

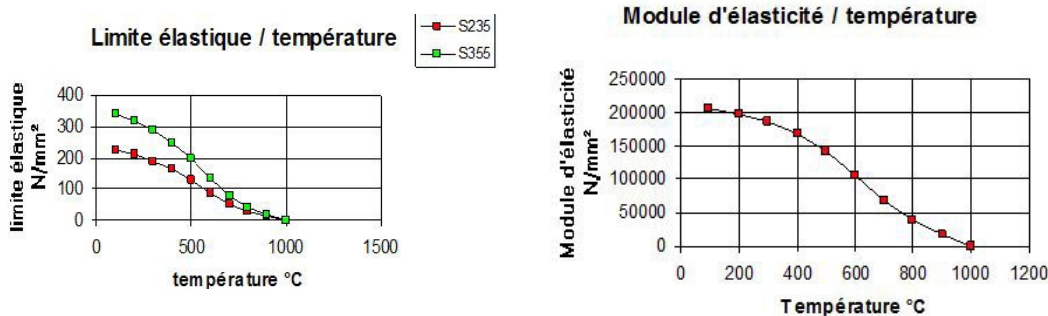
1.4.6 PATHOLOGIE DES ASSEMBLAGES SOUDÉS

La pathologie des assemblages soudés, outre les défauts de construction qui doivent être préalablement éliminés, est principalement liée au comportement en fatigue. Quelques cas particuliers, tels que l'arrachement lamellaire et le dédoublement de tôles, peuvent apparaître au cours de travaux de soudage sur des aciers des années 1960 à 1980.

1.4.7 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

Sur ouvrages existants, le comportement au feu est lié à l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction de la température et du maintien en température.

Les règlements donnent l'évolution de celles-ci :



Figures 76 et 77 : Évolution des caractéristiques mécaniques des aciers en fonction de la température.

A un niveau de 500 °C, l'acier présente des caractéristiques diminuées sensiblement de moitié. La stabilité de la structure est donc fonction de ces valeurs, avec toutes les conséquences de l'élévation en température, dilatations, blocage sur appui ...

A 723°C, l'acier change de structure cristallographique et des transformations métallurgiques peuvent intervenir ; celles-ci sont réversibles mais des phénomènes, tels que le refroidissement rapide, peuvent entraîner des effets de trempe localisée.

Après refroidissement, si la température atteinte n'a pas entraîné de transformation, les caractéristiques d'origine sont retrouvées à quelques effets de diffusion atomique près.

Le point important est de pouvoir caractériser la température atteinte. Les dégradations de la protection anticorrosion sont souvent un bon indicateur de celle-ci.

> **Quelques cas d'ouvrages soumis à incendie :**



Figure 78 : Pont routier en Alabama USA - 5 janvier 2002 - incendie d'une citerne d'hydrocarbures (document Internet).



Figure 79 : Pont sur le Mungo - Cameroun - 2 juillet 2004 - incendie d'un camion-citerne d'hydrocarbures (document Internet).



Figures 80 et 81 : Pont Mathilde Rouen - 29 octobre 2012 - accident d'un camion-citerne sur l'ouvrage et propagation de l'incendie sous l'ouvrage (documents Internet).

La DTecITM (ex SETRA) du CEREMA élabore actuellement un guide intitulé « Résistance à l'incendie – Evaluation des ponts routiers », à paraître.

Le sommaire de ce document comporte :

CHAPITRE I - LE « RISQUE INCENDIE »

CHAPITRE II - LES PHENOMENES THERMIQUES

CHAPITRE III - LES PHENOMENES MECANIQUES PENDANT L'INCENDIE

CHAPITRE IV - LES OUVRAGES INCENDIES

IV.1 - La démarche à suivre après un incendie

IV.2 - Impact sur la durabilité

IV.3 - Exemples d'ouvrages incendiés

Nous proposons de faire un renvoi à ce document pour une interprétation fine des phénomènes.

1.4.8 AUTRES PATHOLOGIES



Figure 82 : Voilement d'âme en cours de lancement
(photo Jean-Paul PERSY).



Figure 83 : Flambement de membrure supérieure de la poutre de rigidité dans le plan (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 84 : Flambement de membrure supérieure de la poutre de rigidité hors du plan (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 85 : Choc de véhicule sur ouvrage moderne - déformations de la membrure inférieure et de l'âme de poutre (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 86 : Effondrement par fait de guerre d'un pont à haubans (photo Jean-Paul PERSY).

2

La réparation des ouvrages métalliques

- 2.1 Méthodes et techniques de réparation
- 2.2 Réparation par soudage
- 2.3 Réparation par boulonnage
- 2.4 Réparation par rivetage

2.1.1

GÉNÉRALITÉS SUR LA DÉMARCHE DE DIAGNOSTIC ET LE PROJET DE RÉPARATION

> **Toute réparation d'un ouvrage doit être précédée par un diagnostic de la structure et des désordres rencontrés. Dans ce cadre, un certain nombre de données doivent être regroupées :**

- le type d'ouvrage et son fonctionnement ;
- la date de construction et de réparations ou renforcements réalisés s'il y a lieu ;
- la géométrie de l'ouvrage ;
- les caractéristiques des matériaux employés :
 - limite élastique,
 - charge de rupture,
 - allongement caractéristique de la ductilité,
- soudabilité (Ceq, état inclusionnaire...) ; les défauts existants observés lors de l'inspection détaillée :
 - fissurations (localisation, dimensions...),
 - corrosion : type de corrosion, appréciation des sections résiduelle...,
 - déformations,
 - défauts d'assemblage : fissuration de soudure, déconsolidation d'assemblage rivé ou boulonné,
 -
- les auscultations réalisées, s'il y a lieu, destinées à la compréhension des désordres et/ou du fonctionnement de la structure ;
- le recalcul de la structure s'il est réalisé.

> **Ces éléments doivent permettre la compréhension des désordres, de leur apparition et le fonctionnement de la structure en l'état. L'analyse de ces éléments permet de conclure sur la ou les pathologies qui affectent l'ouvrage. Par exemple :**

- enrroulement : défaut d'entretien de la protection anticorrosion ;
- corrosion avec réduction de section résistante : matériau sensible, exposition, mauvaise disposition constructive...
- fissuration : fragilité, chocs, sollicitations, fatigue matériau, fatigue des assemblages soudés...
- assemblages rivés et/ou boulonnés : déconsolidation, rupture d'éléments, défauts de conception, défauts d'exécution, modifications, excès de sollicitation...
-

Le recalcul de l'ouvrage sera généralement réalisé avec les moyens actuels, mais il sera nécessaire de remettre en cause les hypothèses simplificatrices de l'époque de construction et intégrer les constats faits lors de l'inspection détaillée (ex : réduction de section suite à la corrosion...). Selon les cas, il sera nécessaire d'ajuster les charges et surcharges prises en compte et d'utiliser des modèles élaborés tels que calcul aux éléments finis pour apprécier les concentrations de contraintes qui peuvent être à l'origine de la formation de fissures.

> Ainsi le projet de réparation pourra être élaboré en prenant en compte l'origine des désordres observés. Le projet devra également examiner le phasage des travaux et les répercussions sur la structure, par exemple :

- le remplacement d'un élément génère un report de charge sur le reste de la structure qu'il sera nécessaire de compenser provisoirement. De plus, l'élément remplacé, sauf disposition particulière, ne contribue pas à la reprise du poids propre de l'ouvrage ;
- le renforcement d'une section apporte une rigidité accrue et, par suite, une modification de la répartition des efforts

2.1.2 MÉTHODES ET TECHNIQUES DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DES STRUCTURES

L'ensemble des techniques et méthodes de construction sont utilisées en réparation, soit en atelier en préparation d'éléments, soit sur site pour raccorder ces éléments à la structure en place.

Les aciers modernes sont élaborés dans un objectif d'assemblage par soudage. Ce souci n'existait pas pour les matériaux métalliques anciens dont l'assemblage était réalisé par boulonnage et/ou rivetage. Depuis les années 1950 environ, les sidérurgistes ont développé les concepts de soudabilité métallurgique afin de faire évoluer les méthodes d'assemblage.

Tout projet de réparation doit faire l'objet d'une étude qui débute par la connaissance du matériau métallique employé et de son comportement métallurgique afin d'apprécier le comportement au soudage, d'adapter les paramètres et, s'il y a lieu, d'exclure celui-ci au profit de techniques d'assemblage telles que le rivetage ou le boulonnage. Compte tenu du mode de fonctionnement différent de ces techniques d'assemblage, il n'est pas possible de les utiliser partiellement sur un même assemblage. Les paragraphes 22, 23 et 24 présentent ces modes d'assemblages et les particularités d'application au cas des matériaux métalliques anciens.

2.1.2.1 Remplacement d'éléments endommagés (extrait de bibliographie [15])

De très nombreux ouvrages sont constitués par des structures triangulées intérieurement hyperstatiques et il est parfois possible de démonter une barre (diagonale, ou montant) sans mettre en cause la stabilité de l'ouvrage sous poids propre. Si l'on se contente de démonter une barre et de la remplacer sans précautions particulières, il est évident que la barre neuve ne participera pas à la résistance de l'ouvrage sous l'effet des charges permanentes. Il convient donc de mettre en place un dispositif provisoire capable d'équilibrer les efforts existant dans la barre à remplacer. Dans le cas d'une barre tendue, ce dispositif peut être facilement réalisé à l'aide de barres de brelage. L'utilisation de barres à haute résistance étant susceptible de fragilité, il convient d'éviter chocs, soudures....

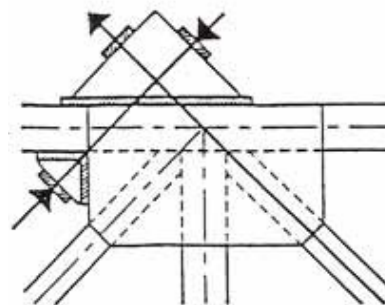


Fig. 87 : Principe d'ancrage de barres de brelage (bibliographie [15] - schéma Ph. Lecroq).



Fig. 88 : Remplacement d'un montant d'une poutre treillis - dispositif provisoire de reprise des efforts par barres de brelage (photo Jean-Paul PERSY).

Dans le cas d'une barre comprimée, il est possible d'imaginer un dispositif similaire composé de butons et de vérins mais un tel système est encombrant et plus difficile à ancrer en ses extrémités.

Afin d'éviter tout effort et déformation parasites, il faut veiller à ce que la résultante des efforts du dispositif provisoire soit portée par la fibre moyenne de la barre.

Il n'est pas toujours facile de connaître avec précision l'effort exact existant dans une barre (charges permanentes mal connues, déformations imposées à l'ouvrage, phasage de construction inconnu ou mal connu, etc.). Pour compenser le manque d'informations, il est possible de procéder de la manière suivante :

- mise en charge du dispositif provisoire à l'effort donné par le calcul ;
- réalisation d'un repère d'alignement de la barre et de son gousset d'attache ;
- élimination des rivets d'attache de la barre sur son gousset et de tout élément pouvant gêner un mouvement relatif ;
- vérification qu'il n'y a pas eu de mouvement relatif barre-gousset, sinon ajustement de l'effort dans le dispositif provisoire de sorte à réaligner le repère.

En appliquant les mêmes principes il est possible de remplacer des goussets d'attache de barres (opération délicate nécessitant des vérifications par étapes) mais, ceux-ci assurant en général la liaison entre trois barres (deux diagonales et une membrure par exemple), il convient, soit de mettre en place un dispositif qui annule les efforts dans les deux diagonales simultanément (ce qui n'est pas toujours facile à réaliser), soit de procéder par étapes selon le phasage suivant (Fig. 79) :

- reprise des efforts dans la diagonale A par un dispositif provisoire ;
- coupe du gousset en deux parties suivant la bissectrice des deux diagonales ;
- dépose du demi-gousset attachant la diagonale A ;
- mise en place d'un demi-gousset neuf ;
- mêmes opérations pour la diagonale B ;
- soudure des deux demi-goussets entre eux.

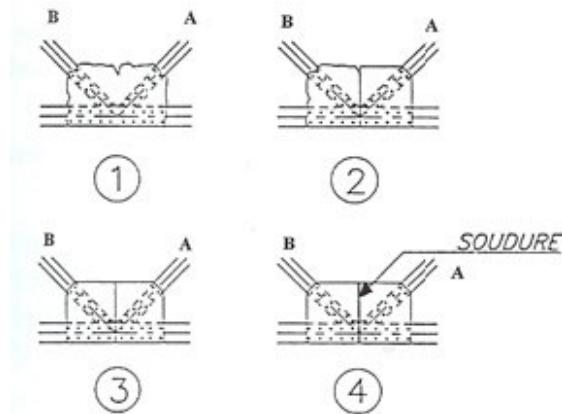


Fig. 89 : Remplacement de gousset (bibliographie [15]).

Afin de limiter les contraintes dues au retrait de soudage, les rivets voisins du joint ne seront mis en place qu'après réalisation de la soudure. Si cela n'est pas possible, la soudure sera remplacée par une éclisse rivée ou boulonnée.

2.1.2.2 Ajout de matière (extrait de bibliographie [15])

Il est possible de renforcer une structure métallique en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle. Cette possibilité ne doit pas faire oublier les précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement.

Si l'on excepte certains cas particuliers où les efforts dus au poids propre sont nuls ou très faibles (ponts suspendus et viaduc métalliques démontables par exemple), il convient de soulager les efforts dans la structure lors du renforcement, de sorte que ce dernier participe au moins partiellement à la résistance sous poids propre. Pour ce faire, trois méthodes sont couramment utilisées:

- installation de l'ouvrage sur appuis provisoires. Mais cette méthode, simple et efficace, n'est que rarement envisageable pour d'évidentes raisons de site ;
- mise en œuvre d'une précontrainte provisoire. Lorsqu'il s'agit de renforcer une diagonale ou un montant, l'installation et l'ancrage de barres de brelage ne pose pas de problèmes majeurs dans les cas courants. Lorsqu'il s'agit de renforcer une membrure de poutre, l'ancrage des barres ou des câbles de précontrainte pose des problèmes technologiques (difficulté pour ancrer un effort concentré en partie courante d'une membrure, problèmes d'encombrement aux abouts de l'ouvrage) ;
- recours aux dénivellations d'appuis : cette méthode, facile à mettre en œuvre dans de nombreux cas, voit son domaine d'application limité par la résistance des sections sollicitées par les transferts d'efforts.

L'augmentation des sections des membrures modifie la rigidité et la loi d'inertie de la structure, ce qui provoque une modification de la courbe des moments fléchissant et il convient d'en tenir compte dans le calcul.

Il ne faut pas oublier de vérifier et éventuellement de renforcer les goussets d'attache.

Il est inutile de prévoir des renforts en acier à haute limite élastique, les contraintes à ne pas dépasser en service normal étant limitées par la qualité des aciers en place.

> **En ce qui concerne les dispositions constructives, il faut :**

- a) éviter les concentrations de contraintes et les efforts parasites en débardant les extrémités des pièces de renfort, en meulant les extrémités des cordons de soudure, en réalisant l'attache des pièces de renfort dans des zones où l'effort est aussi faible que possible, en respectant le tracé des lignes d'épures, etc. ;
- b) éviter de créer des « pièges à eau » ; cette exigence est parfois en contradiction avec le maintien de la position des centres de gravité. La figure 90 illustre cette contradiction : le renfort de la membrure supérieure modifie la position du centre de gravité de cette membrure mais ne gêne pas l'évacuation des eaux de pluie. Le renfort de la membrure inférieure présente le défaut inverse. Dans le cas où il n'est pas possible de concilier les deux exigences, il y a lieu d'éviter les pièges à eau et de réaliser un modèle de calcul tenant compte des excentricités des centres de gravité.

Cette disposition est à exclure si elle constitue un piège à eau et/ou à poussière.

La figure 91 présente le renforcement du pont de Douarnenez par des barres rectangulaires positionnées sous les membrures, entre les lignes de rivets.

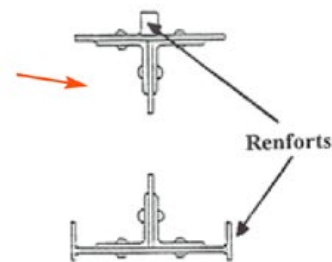


Fig. 90 : Ajout de matière.

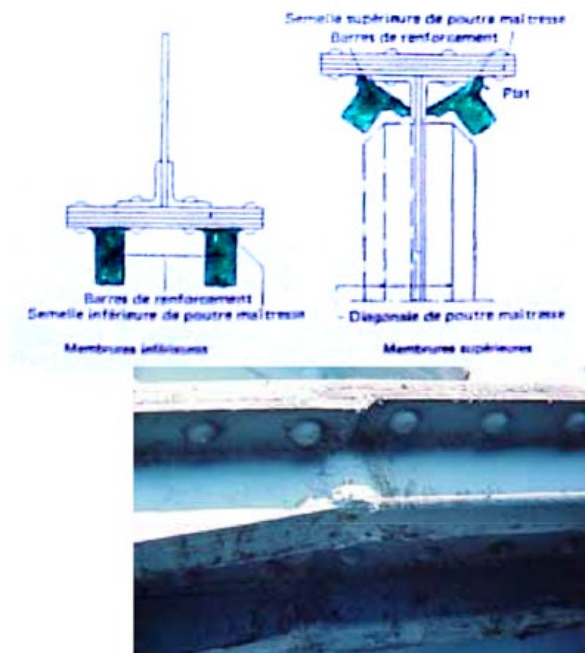


Fig. 91 : Ajout de matière sous la membrure inférieure entre lignes de rivets (Pont de Douarnenez) - (photos Jean-Paul PERSY).

Dans de nombreux cas, la résistance d'une barre (diagonale ou membrure) est limitée non par sa limite élastique mais par sa contrainte critique de flambement. Dans un tel cas, le problème est très simplifié puisqu'il n'est nécessaire ni d'annuler (ou de réduire) les contraintes à vide, ni d'assurer l'attache du renfort aux extrémités de la barre. Il convient toutefois de prendre les précautions élémentaires suivantes :

- éviter que le renfort constitue un piège à eau ;
- maintenir la position des centres de gravité ;
- empêcher les concentrations de contraintes en évitant les changements de section trop brutaux ;
- tenir compte de la nouvelle loi d'inertie dans le cas du renforcement d'une membrure.

L'ajout de matière peut aussi être réalisé par des éléments plats au niveau des âmes et des membrures. L'assemblage pourra être effectué par soudage, par rivetage ou boulonnage. La figure 92 présente différentes dispositions de renforcement par placage.

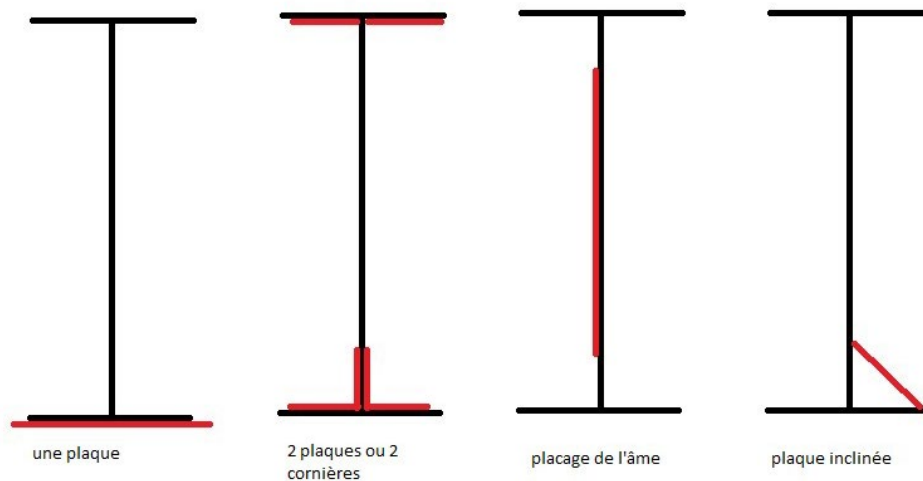


Fig. 92 : Renforcement par placage d'une poutre en I.

2.1.2.3 Déconsolidation d'assemblages rivés (extrait de bibliographie [27])

> Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs rivets surcharge les rivets encadrants et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les rivets défectueux :

- soit par de nouveaux rivets au moins du diamètre immédiatement supérieur à ceux remplacés, posés avec soin, sous réserve du respect des règles de trusquinage (pinces...)
- soit, si l'on est dans l'impossibilité de poser de nouveaux rivets, par des boulons HR, à condition de remplacer tous les rivets constituant l'assemblage et de maîtriser le coefficient de frottement des surfaces en contact.
- soit, dans le cas où le nombre de rivets à remplacer est faible, par boulons calibrés,
- soit, par des boulons injectés.

L'alésage définitif avant la pose du rivet ou du boulon de substitution doit avoir fait complètement disparaître l'ovalisation éventuelle du trou engendrée par l'ébranlement.

Il arrive fréquemment que l'état des pièces se soit dégradé dans le temps en raison de l'ébranlement ou que les rivets soit mal posés. D'autre part, l'enlèvement des anciens rivets et la pose de nouveaux, si ces opérations ne sont pas réalisées dans les règles de l'art, fatiguent toujours quelque peu le métal des pièces à assembler (chocs, déformations). Si bien qu'un tablier métallique peut se trouver en plus mauvais état après réparation qu'avant. Ces travaux doivent donc être réalisés par des entreprises qualifiées et nécessite une surveillance continue.

> Les réparations des ébranlements nécessitent toujours une étude préalable en vue de déterminer :

- s'il est nécessaire, pour éviter le retour de l'avarie, de réaliser un renforcement de l'assemblage (par exemple : établissement d'une continuité entre longerons, pose d'un raidisseur sous dispositif d'attache de voie),
- si le diamètre du rivet ou boulon définitif est compatible avec les règles de trusquinage (pas, pince). Dans le cas contraire, il y aurait lieu de remplacer les pièces concernées.



Fig. 93 : Déconsolidation d'assemblage rivé avec rupture de rivet (photo SNCF).

Dans le cas de tabliers en acier doux ou en fer puddlé, des contrôles non destructifs peuvent être nécessaires pour s'assurer qu'il n'y a pas de fissures initiées autour des trous de rivets dans les parties non visibles (sur les âmes des longerons, sous les cornières membrures ou montantes par exemple).

La réparation des déconsolidations d'assemblages boulonnés HR nécessite une étude spécifique.

2.1.2.4 Eviter les zones de concentration de contraintes, améliorer le comportement à la fatigue

Le bridage des soudures, les variations brutales de géométrie, ... constituent des zones de concentration de contraintes et peuvent générer des initiations de fissure sous effets de sollicitations répétées (fatigue). Il convient d'adopter des dispositions constructives adaptées pour épanouir les concentrations de contraintes, tout particulièrement sur les matériaux métalliques anciens de soudabilité médiocre.

La figure 94 présente la fissuration d'une poutre d'ouvrage ancien sous l'effet de bridage de soudage au niveau des angles d'un mouchoir positionné en réparation d'un impact. La réalisation d'arrondi (rayon de 5 cm par exemple) aurait été de nature à améliorer cette réparation.

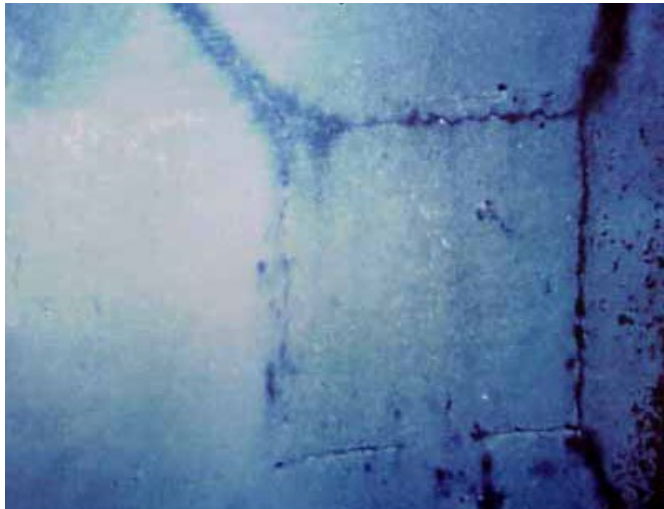


Fig. 94 : Fissuration par concentration de contraintes en zone de fort bridage (photo CETE Méditerranée).

La figure 95 présente une réparation par ajout d'un gousset d'épanouissement au niveau d'une variation géométrique de la membrure inférieure. Les effets de concentrations de contraintes, amplifiés par le rail de lancement interrompu dans la même section, ont entraîné la fissuration de la membrure inférieure du caisson à proximité de l'appui.

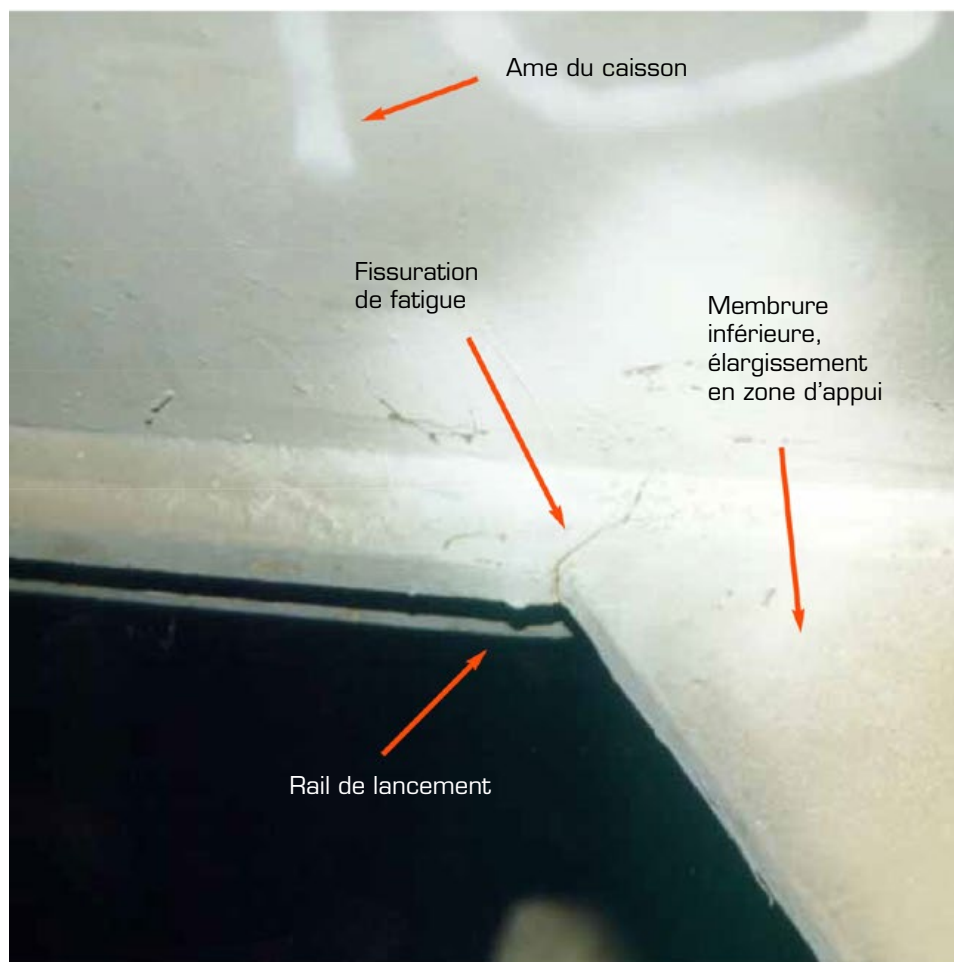


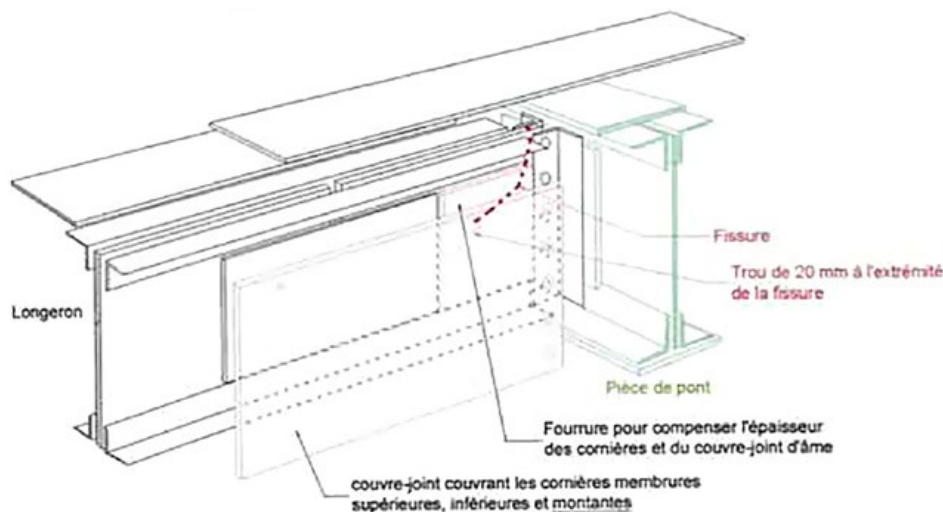
Fig. 95 a et b : Désordre de fatigue et réparation avec gousset d'épanouissement (photos Jean-Paul PERSY).

> **Pour améliorer le comportement d'assemblages soudés, diverses techniques peuvent être mises en œuvre, par exemple :**

- le meulage du bombé des soudures bout à bout,
- l'élimination de caniveaux par rechargement,
- la refusion TIG permet un raccordement adouci en pied de cordon d'angle ; il peut aussi être employé des électrodes à coulabilité améliorée,
- le shoot peening ou grenailage de précontrainte permet par écrouissage à froid l'inversion des contraintes résiduelles de traction dues au bridage.

Toutefois, ces techniques sont efficaces uniquement si elles sont appliquées au niveau de la zone d'initiation des fissures de fatigue.

La technique d'arrêt de fissure au moyen d'un trou peut être employée en phase provisoire ou définitive en accompagnement d'un renforcement par placage par exemple. Pour être efficace, le trou (f 20 mm) doit être réalisé en pointe de fissure, ce qui nécessite généralement une localisation par ressuage. Le trou ne doit pas être rebouché, même si les lèvres de la fissure sont ressoudées. La figure 96 présente une réparation par placage d'une âme de longeron. Cette opération nécessite la pose d'une fourrure pour compenser l'épaisseur des cornières. L'assemblage sera réalisé par rivetage après réalésage des trous et utilisation de rivets de diamètre supérieur.



Vue éclatée d'une triple d'attache de longeron sur pièce de pont

Fig. 96 : Réparation par placage d'une âme de longeron fissuré par fatigue (schéma SNCF).

2.1.2.5 Eviter ou limiter la corrosion

Certaines dispositions constructives anciennes génèrent des espaces entre pièces qui rendent impossible l'application d'une protection anticorrosion. L'étanchéité pourra être obtenue par rechargement et/ou par la pose d'une fourrure soudée sur les tôles ou les profilés en place (figures 97 et 98). Cette technique présente des difficultés d'exécution et peut présenter certains risques de fissuration sur des aciers anciens non soudables. L'étanchéité peut aussi être obtenue par masticage mais nécessite une maintenance rigoureuse.

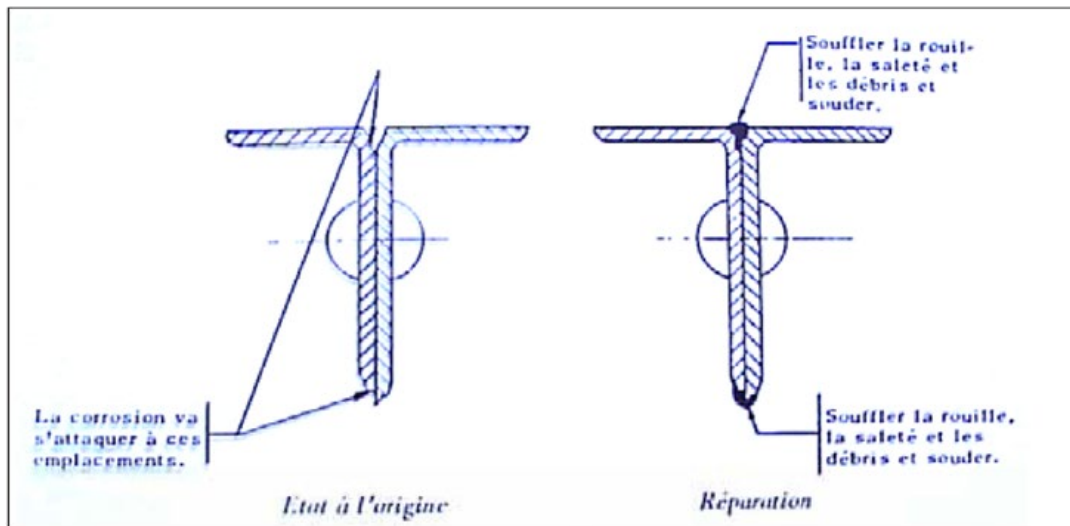


Fig. 97 : Schéma de rechargement par soudure.

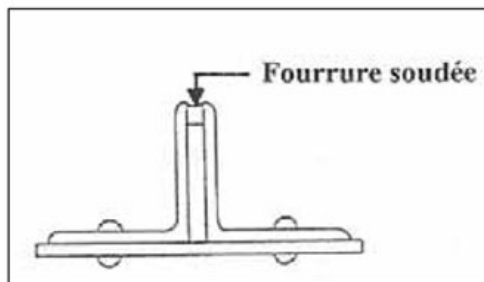


Fig. 98 : Schéma d'une fourrure soudée [bibliographie [15]].

Sur les poutres jumelles l'utilisation de matériaux de remplissage tel que du béton se révèle inadaptée du fait du retrait et de la formation de zone de corrosion à l'interface acier – béton.

2.1.2.6 Utilisation des chaudes de retrait

La pratique des chaudes de retrait, essentiellement utilisée par les constructeurs métalliques en atelier, consiste à chauffer localement le métal en vue de réduire les déformations accidentelles ou non, résultant d'opérations antérieures, telles que le soudage, ou de produire volontairement des déformations impossibles à obtenir par un moyen mécanique.

Les chaudes de retrait génèrent des cycles thermiques et imposent des gradients de température susceptibles de modifier la structure métallographique du métal et de dégrader ses caractéristiques initiales. Le phénomène utilise les contraintes générées par les dilatations, les plastifications et les contractions produites par un cycle thermique localisé de chauffage et de refroidissement. La source de chaleur est généralement un chalumeau ou, pour les tôles minces, un inducteur.

Toute opération de chauffe de retrait est potentiellement une source de risques pour la construction métallique dans la mesure où, si le cycle thermique est mal maîtrisé, les caractéristiques des matériaux peuvent être affectées.

L'objectif essentiel de l'opérateur est d'obtenir une déformation satisfaisante sans pour autant dépasser une température maximale, variable selon la nuance de l'acier : les températures maximales de peau n'entraînant ni dégradation de la résistance mécanique ou de la tenue à la corrosion, ni augmentation de la fragilité, sont comprises entre 800 et 1 200°C, selon la nuance et l'épaisseur.

La norme NF EN 10025 et le NF EN 1090-2 précisent des restrictions d'utilisation du formage à chaud pour les aciers thermomécaniques (NF EN 10025-4 paragraphe 7.4.2 .1) et trempés et revenus (NF EN 10025-6 paragraphe 7.4.2 .1). Le formage à chaud implique un chauffage homogène pleine épaisseur pendant le temps nécessaire à l'opération de formage. L'utilisation de chauffe de retrait correspondant à un chauffage ponctuel avec maintien de courte durée est possible pour les aciers thermodynamique et trempés – revenus, moyennant certaines précautions (NF EN 1090-2, document OTUA / AFGC mai 1997 **Les aciers Thermomécaniques, une nouvelle génération d'aciers à hautes performances** - bibliographie [8]).

> **Cette technique d'atelier, qui peut être proposée dans le cas de réparation sur site, de préférence localisée, devra mettre en œuvre une procédure appropriée pour s'assurer :**

- de l'absence de modification de la structure métallographique du métal et de la dégradation de ses caractéristiques mécaniques. Ce point analogue aux conditions d'atelier est présenté dans le guide R1010neo du CETIM **Chaudes de retrait - Guide pratique : effets sur les propriétés d'emploi des aciers et des alliages d'aluminium** [bibliographie 28].
- de la stabilité de la structure sous l'effet de l'affaiblissement des caractéristiques des aciers à température élevée avant refroidissement. La norme NF P 92-702 **Règles de calcul – Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier** présente les courbes types à prendre en compte.

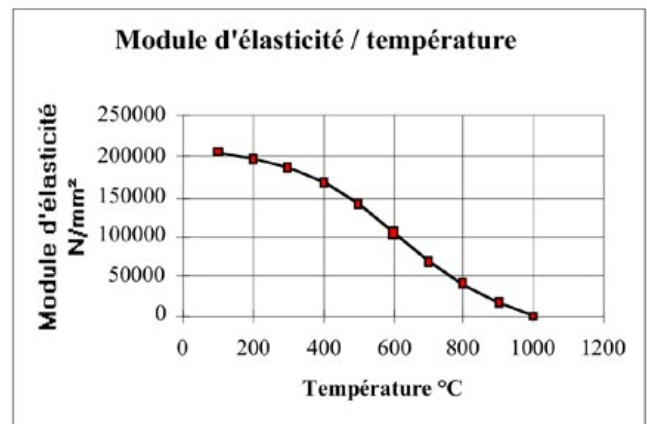
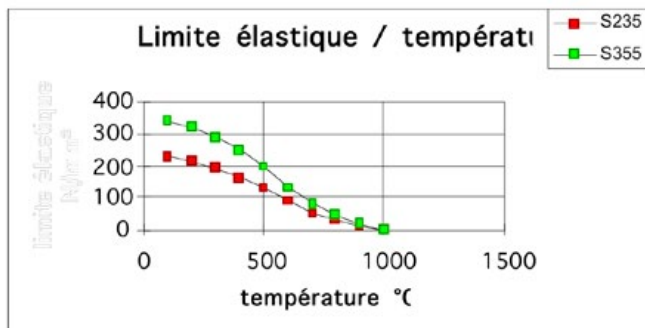


Fig. 99 : Comportement des aciers à température élevée – norme NF P 92-702

2.1.2.7 Appareils d'appui

En cas de désordre, les appareils d'appui doivent être remplacés ou remis en état et recalés après démontage et remplacement des éléments dégradés.

Parmi les appareils d'appui métalliques, les appareils à rouleaux multiples sont les plus vulnérables aux phénomènes de corrosion (feuilletage), notamment à proximité des joints de chaussée dont l'étanchéité laisse à désirer. Les ruptures de dents révèlent un fonctionnement anormal du système (effort horizontal excessif et/ou concentré en un point, dents mal conçues avec frottement important). Une forte inclinaison de rouleaux tronqués doit faire l'objet d'une prise de décision rapide.

A noter que le remplacement des appareils d'appui à balanciers et à rouleaux par un autre système d'appareils d'appui n'est pas toujours pertinent pour des raisons de modification de la répartition des efforts horizontaux sur les piles et culées ou des raisons architecturales.

Les normes NF EN 1337 - 4 et 6 proposent le marquage CE pour des appareils métalliques neufs ; on peut s'en inspirer pour établir un diagnostic selon les charges et l'état de l'ouvrage.

La vérification des contraintes hertziennes et l'état de corrosion sont essentiels pour la suite à donner. Une solution est parfois de substituer de l'inox à l'acier en place pour le balancier inférieur et le rouleau.

Pour les petits ouvrages, il est possible de remplacer ces appareils d'appui par des appareils d'appui en élastomère fretté sous réserve de prévoir un système de guidage et d'en tenir compte dans le dimensionnement.

(Consulter également le guide FAEQ 5 § 3.6 et le Fasc. 13 de l'ITSEOA § 3.6)

Portance hertzienne des appareils d'appui

Calcul des charges possibles sur une ligne de contact plan-cylindre (entre acier identique) :

Contrainte de Hertz : $\sigma_{hz} = 0,418 [(N * E) / (L * R)]^{0,5}$ (en N, mm et MPa)

L : Longueur de la ligne de contact ; R : Rayon de courbure / plan de roulement

f_y : Limite élastique de l'acier en MPa ; f_u : Limite de traction de l'acier en MPa

E : Module d'élasticité de l'acier : 210 000 MPa

N : Charge verticale en Newton ; N'_{rk} : Charge unitaire en N/mm ; $N' = N / L$

β : Coefficient forfaitaire d'excentrement (cf. 1337-1) : $1/10 L$ applicable à l'EC : soit $\beta = 0,8$

Usage courant avant 1960 : $\sigma_{hz} \sim 2 f_u$ (sans pondération)

Règles de 1960-72 : $\sigma_{hz} \leq 4 f_y$ pour l'acier moulé ; $\sigma_{hz} \leq 3 f_y$ pour l'acier laminé (soll. pondérée)

Règles → 1972 : $\sigma_{hz} \leq 5,3 f_y$ pour l'acier moulé ; $\sigma_{hz} \leq 4 f_y$ pour l'acier laminé (soll.licit.ELU)

NF EN 1337- 4 à 6 : $N'_{rk} \leq (23 * f_u^2 * R * \beta) / E$ qui correspond à $\sigma_{hz} \leq \sim 1,8 f_u$ (ELU - EC)

Réduction pour appareil comportant plus de 2 rouleaux : avant 1960 non spécifiée, Fasc 61-V dès 1960 : 20 %, NF-EN 1337 : 33%

Identification des nuances d'aciers moulés :

Dans certains cas la nuance est gravée sur l'un des éléments (sinon recherche dans le dossier d'ouvrage).

Exemples de pression limite de Hertz en MPa selon les aciers et les règles de calcul :

	Règles 60-72	Règles → 72	NF EN 1337-4et6 *
■ Aciers moulés (NF A 32 051) : E : lim. élastique ; M : lim. traction en Kg/mm ²)			
E 20 – 40 M784	1 040	704	
E 23 – 45 M	90	1 096	792
E 26 – 56 M	1019	1 352	985
E 30 – 57 M	1176	1 560	1 003
■ Aciers laminés (NF EN 10 025)			
S 235 (selon épaisseur 40 à 200 mm)		860 à 740	645 à 610
S 355 (selon épaisseur 40 à 200 mm)		1 340 à 1 140	843 à 807

* Réduction forfaitaire pour excentrement transversal $\beta = 0,8$ comprise

■ Aciers inoxydables X 40 Cr 13 selon NF EN 10027 trempés et traités en surface de contact, dureté 6 000 MPa

Fabrication spéciale pouvant accepter $\sigma_{hz} = 2300$ MPa environ

Pour les appareils d'appui des ouvrages en service, il n'y a pas lieu de mettre en conformité avec les limites de pression fixées par la norme NF EN 1337, les limites des Fasc. 61-V étant tout à fait acceptables.



Figure 100 : Modification souhaitable
(photo Yves Picard).

Figure 101 : Corrosion à traiter lors de la remise en peinture de l'ouvrage (photo Yves Picard).



Figure 102 : Rupture du dispositif anti-cheminement sur appareil d'appui à balancier (photo Yves Picard).



Figure 103 : Cheminement d'appareil d'appui à rouleaux (photo Jean-Paul PERSY).

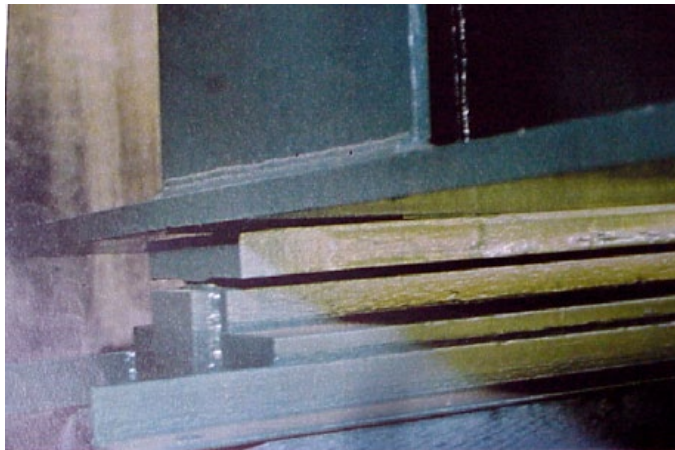


Figure 104 : Défaut de contact - défaut de planéité par déformation de retrait de la soudure âme - membrure inférieure (photo Jean-Paul PERSY).



Figure 105 : Défaut de contact d'un appareil néoprène par défaut de parallélisme des surfaces (photo Jean-Paul PERSY).

2.2.1 INTRODUCTION

La soudure est en théorie le moyen le plus souple et le plus efficace pour réparer ou renforcer un ouvrage. Son utilisation pose cependant des problèmes parfois difficiles à résoudre ; en effet il est rare de trouver un acier ancien dont la soudabilité soit équivalente à celle des aciers modernes ; de plus les soudures étant réalisées in situ et en position, l'utilisation de certaines techniques de soudage est exclue. Le soudage relève de la métallurgie. La soudabilité des aciers (des fers puddlés de la fin du XIXème siècle aux aciers modernes) a évolué considérablement. Depuis 1950 environ, les sidérurgistes ont basé le développement des aciers en privilégiant leur soudabilité. Avant toute opération, il faut connaître le matériau, sa composition chimique, son élaboration et la façon dont il interagit dans la structure (les efforts qu'il transmet, son niveau de bridage, de sollicitation en fatigue...) pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que les assemblages seront fortement sollicités.

2.2.1.1 Définitions

Le soudage est l'opération d'assemblage qui assure la continuité métallique de deux pièces par phénomène de fusion locale.

Les aciers modernes se caractérisent par leur soudabilité : aptitude à être soudé, d'où la nécessité dans le cadre d'une réparation d'ouvrage ancien de s'assurer de la soudabilité des matériaux en présence.

La recommandation R 581/1967 de l'ISO définit ainsi la soudabilité : « On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement. »

> **Derrière cette définition typiquement normative, il est possible de distinguer plusieurs définitions de la soudabilité en fonction des paramètres qu'elle fait intervenir :**

- la soudabilité métallurgique, qui est fonction du matériau et uniquement de lui, tout autre paramètre étant fixé ;
- la soudabilité opératoire, qui est fonction du matériel et du personnel nécessaire à la réalisation de la soudure ;
- la soudabilité globale, qui fait intervenir le tracé des pièces destinées à la réalisation du joint soudé.

> **Dans la notion de soudabilité métallurgique, on peut encore distinguer trois aspects de jugement, qui sont fonction du type de défauts métallurgiques constatés :**

- **la fissuration à chaud** se traduit par la présence de fissures, le plus souvent dans le métal fondu, attribuables à la présence de contraintes importantes au moment où le métal est encore très chaud. Ces incidents sont facilement décelables par un contrôle correct à la fabrication ;
- **la fissuration par «arrachement lamellaire** », conséquence d'une fissuration, se produit dans des plans parallèles à la peau du produit laminé, au droit d'une soudure sollicitant ce matériau dans la direction de l'épaisseur ;

- la **fissuration à froid**, qui apparaît généralement dans le métal de base, est, de loin, le type de défaut le plus redouté dans le soudage des aciers, au point que la notion de soudabilité des aciers est souvent confondue avec leur susceptibilité à ce défaut.

2.2.1.2 Matériaux supports

L'historique des ouvrages métalliques fait apparaître successivement 3 types de matériaux employés pour la construction des ouvrages d'art : la fonte, le fer puddlé, l'acier.

Ces différents matériaux et leur caractérisation sont présentés dans la première partie du guide.

2.2.2 NOTIONS DE MÉTALLURGIE DU SOUDAGE (EXTRAIT DE BIBLIOGRAPHIE [14])

> **Au cours de l'opération de soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre :**

- un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale du métal et la température de fusion de celui-ci, suivant la distance entre la zone fondue et le point considéré ;
- un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement, comme nous le verrons, de l'ensemble des conditions opératoires (et notamment des paramètres de soudage, de la géométrie du joint, du procédé de soudage et de son rendement thermique ...).

Un tel cycle thermique provoque des transformations structurales qui dépendent de la température maximale atteinte, de son temps de séjour, et des conditions de refroidissement du métal au point considéré.

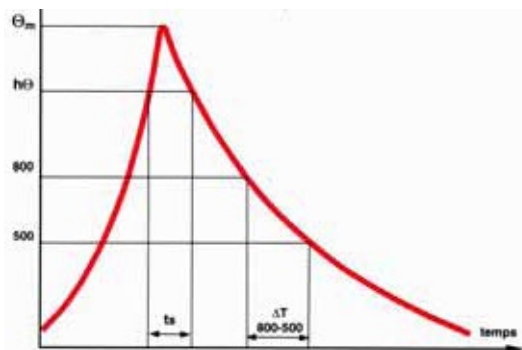


Fig. 106 : Cycle thermique de soudage.

> **La figure 107 ci-après reproduit un exemple des modifications structurales se produisant au voisinage d'une soudure sous flux solide d'acier du type E 36 C- Mn à l'état normalisé. Il est possible de distinguer :**

- la région du métal de base où la température maximale atteinte reste inférieure à environ 600°C, dans laquelle, à l'examen métallographique, on ne détecte pas de modification structurale visible ;
- une zone où la température maximale atteinte est comprise entre 600°C et A_{c1} (transformation du diagramme de phase – voir la 1^{ère} partie du guide). Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone, précipitation et coalescence en présence d'éléments dispersoïdes, légère globulisation de la perlite ;

- une zone de température maximale comprise entre Ac_1 et Ac_3 . Le franchissement du point Ac_1 conduit à des modifications structurales importantes et l'on pénètre alors dans la partie visible de la zone affectée par la chaleur ou ZAC ; sur la figure, on voit que l'austénitisation partielle du métal conduit à une structure à grains très fins ;
- une zone, non illustrée sur la figure, où la température est comprise entre Ac_3 et 1200°C , où apparaîtront successivement des structures semblables à des structures de normalisation et des structures plus grossières ;
- la zone adjacente au cordon de soudure, où la température maximale atteinte est très élevée (supérieure à $1\ 200^\circ\text{C}$). Dans cette région, le grossissement très important du grain austénitique confère au métal une forte trempabilité qui conduit, après refroidissement, à des structures aciculaires très grossières, voire à des structures de trempe pour les refroidissements les plus rapides.

Cette dernière région, qu'il est convenu d'appeler zone à gros grains, est la source de la plupart des problèmes soulevés par le soudage des aciers. C'est là en effet que risquent de prendre naissance et de progresser les fissures à froid et c'est également dans cette région que les propriétés mécaniques du métal (notamment en ce qui concerne la résistance à la rupture fragile) sont le plus modifiées. C'est donc à l'étude de cette zone que l'on doit particulièrement s'attacher pour comprendre les difficultés rencontrées au cours du soudage et définir les moyens permettant de les éviter.

> Il faut remarquer, qu'en fait, la zone affectée par la chaleur subit un cycle thermique qui s'apparente à une opération de traitement thermique :

- austénitisation partielle ou totale,
- refroidissement ultérieur.

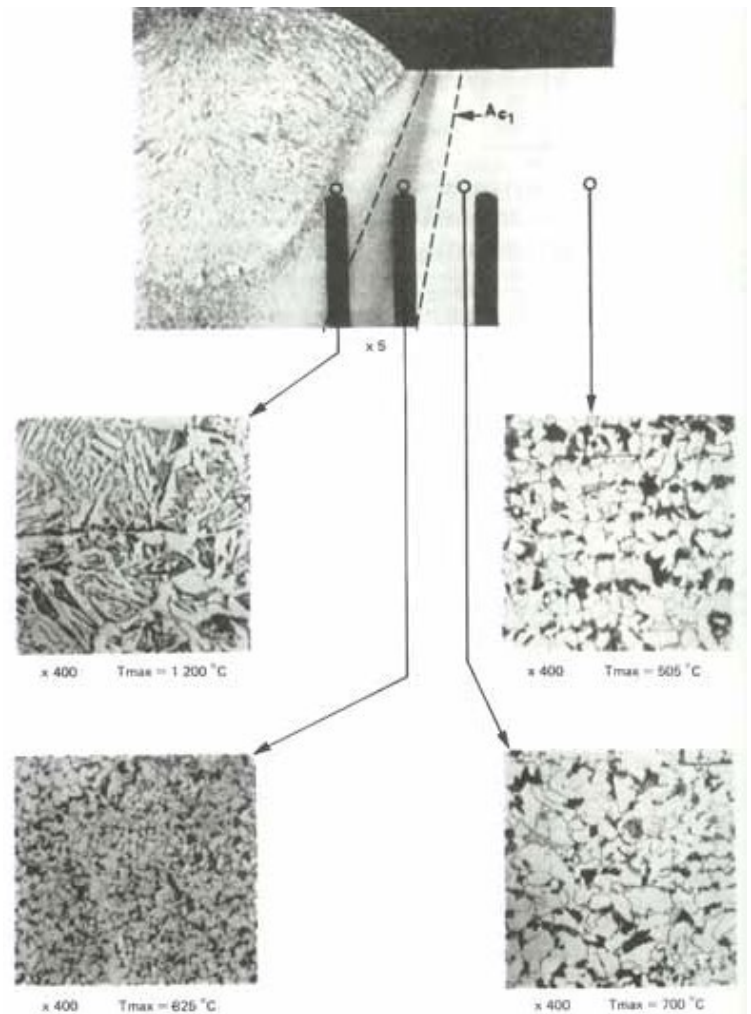


Fig. 107 : Structures de transformations métallurgiques de soudage - Acier de type E 36 C-Mn, normalisé - Attaque au nital 3%. - IRSID (bibliographie [17]).

Dès lors, il est possible de raisonner en termes de cinétique de transformation et se référer donc au document qui va décrire cette cinétique, c'est-à-dire au diagramme de transformation en refroidissement continu, pour autant, bien entendu, qu'il ait été tracé après austénitisation dans les conditions propres au soudage, à savoir chauffage très rapide à 1 250/1 300 °C sans maintien avant refroidissement.

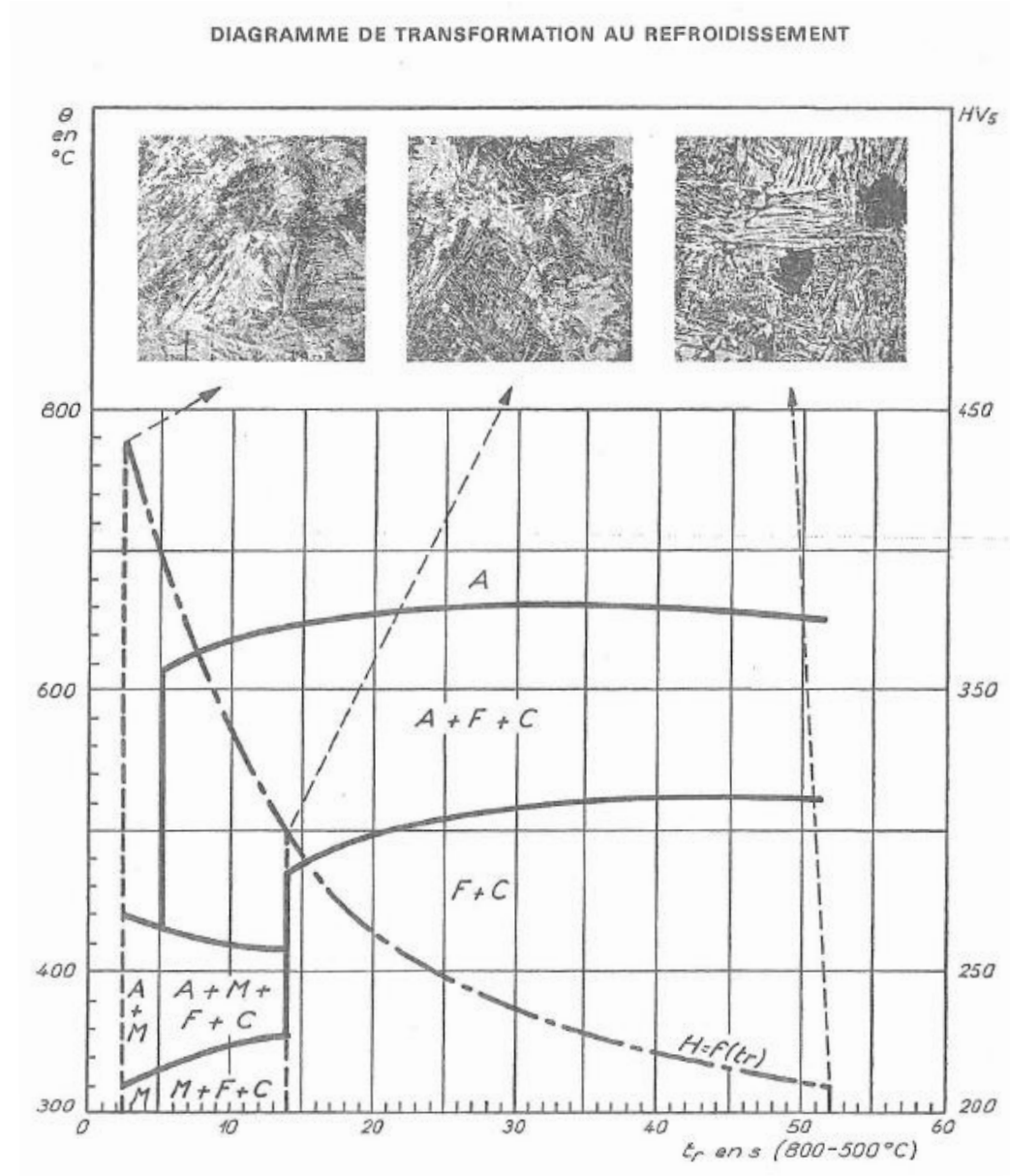


Fig. 108 : Diagramme de transformation en refroidissement continu en condition de soudage - IRSID (bibliographie [17]).

La figure 108 reproduit, à titre d'exemple, le diagramme de transformation en refroidissement continu dans les conditions du soudage d'un acier du type E 36 (A52).

De façon classique, les refroidissements les plus rapides conduisent à des structures martensitiques et on rencontrera successivement, en allant vers les refroidissements plus lents, les structures mixtes (mélange de martensite et de bainite), le cas échéant les structures bainitiques et enfin les structures de type ferrite - carbures.

De façon également classique, la dureté de ces structures décroît depuis les structures les plus trempées correspondant aux refroidissements les plus rapides jusqu'à celles correspondant aux refroidissements les plus lents.

Ce diagramme de transformation en refroidissement continu « en conditions de soudage », permet, pour un acier, de relier la microstructure formée, paramètre essentiel de la métallurgie du soudage, au cycle thermique subi par la zone affectée par la chaleur. Toutefois cette méthode est délicate et exige un équipement et des examens métallographiques réservés au laboratoire. Il est préférable d'utiliser des paramètres chiffrables tels que la dureté qui reste représentative, pour un acier et des conditions d'austénitisation donnés, de la micro-structure formée.

La mesure de dureté dans la zone affectée par la chaleur (Z.A.C.) dans un cordon de soudure est appelée « dureté sous cordon ».

> La microstructure formée et la dureté sous cordon dépendent fortement pour un acier et une température d'austénitisation donnée, du cycle de refroidissement (fig. 96) Celui-ci caractérise des conditions de soudage. Pour un point donné du joint, le cycle thermique est en pratique décrit par :

- la température maximale atteinte (température d'austénitisation) liée à la distance à la ligne de fusion ;
- la vitesse de refroidissement, qui est liée aux paramètres :
 - Energie linéaire de soudage (UI/v)
 - Caractéristiques géométriques du joint,
 - Température de préchauffage,
 - Rendement du procédé de soudage.

Le critère de refroidissement retenu est le temps écoulé entre les températures de 800 et 500°C (Δt_{500}^{800}).

Dans la bibliographie il existe d'autres critères, tels que le temps écoulé entre les températures de 700 et 300°C (Δt_{300}^{700}) préconisé à l'époque par l'IRSID (bibliographie [17]).

En associant dureté sous cordon (caractéristique de la structure métallurgique de la Z.A.C.) et paramètre de refroidissement (caractéristique du cycle thermique de soudage) après austénitisation à 1300°C, on obtient pour chaque acier une courbe « dureté – paramètre de refroidissement » qui n'est autre que la présentation sous une forme chiffrée des informations contenues dans le diagramme de transformation en refroidissement continu.

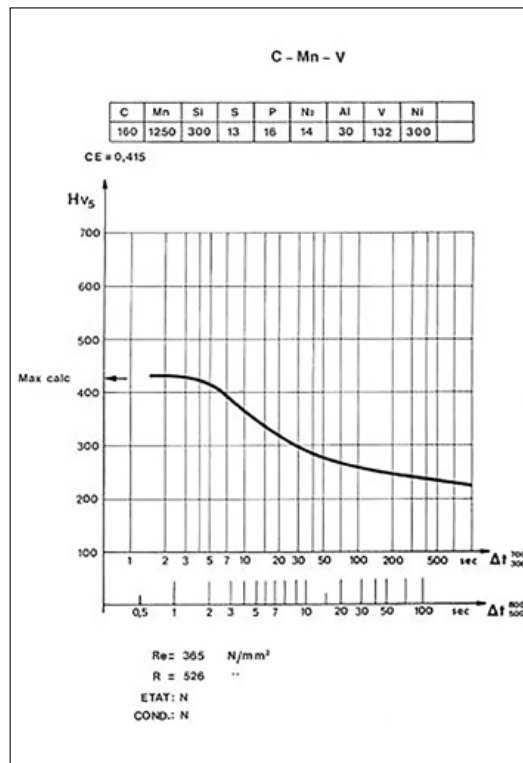
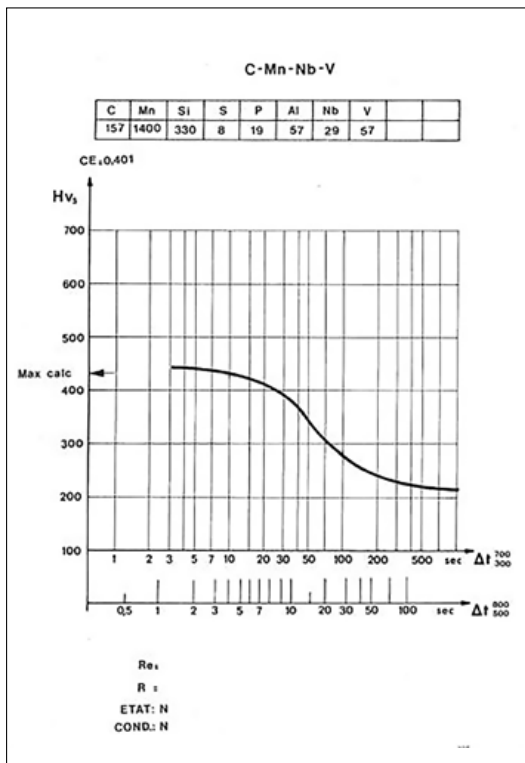
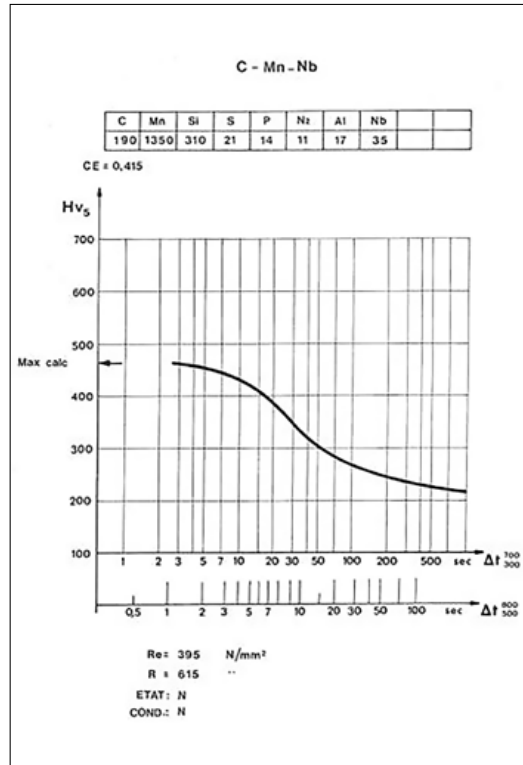
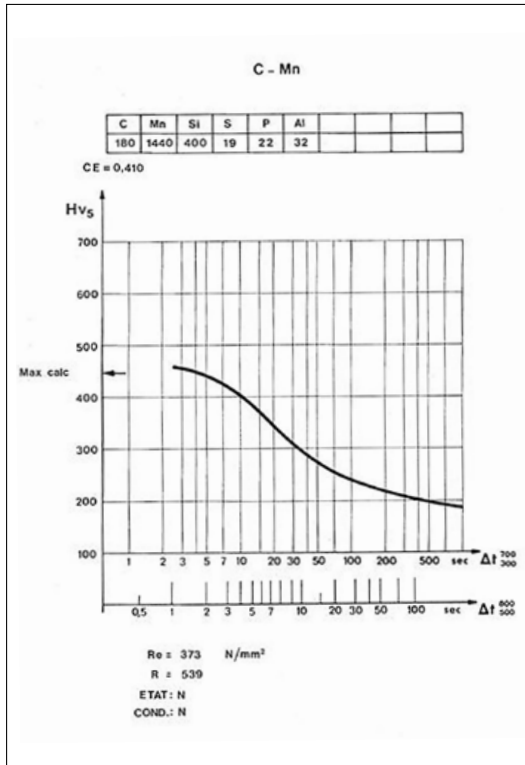


Fig. 109 : Courbes de dureté - paramètre de Refroidissement - Aciers E 36 au C - Mn et aciers à dispersoïdes à C_{eq} analogues. IRSID (bibliographie [17])

> Ces courbes se caractérisent par :

- un plateau supérieur où la dureté varie peu en présence de structures essentiellement martensitique ;
- une zone de forte pente qui correspond à la traversée du domaine mixte ;
- un dernier tronçon de plus faible pente tendant asymptotiquement vers une valeur de 210 Vickers et qui correspond à des structures ferrite + carbures.

L'examen des courbes dureté – paramètre de refroidissement donne un certain nombre d'informations métallurgiques qui, sans être aussi complètes que celles que l'on peut retirer des diagrammes de transformation, sont cependant souvent plus facilement vérifiables ou en tout cas plus accessibles.

2.2.3 LES DÉFORMATIONS AU SOUDAGE

Les opérations de soudage constituent un traitement thermique localisé qui entraîne au chauffage des dilatations et au refroidissement des contractions souvent dissymétriques du matériau. La figure 110 présente différents cas de déformations par bridage de soudage qu'il est possible de compenser par une préparation adaptée du joint à souder.

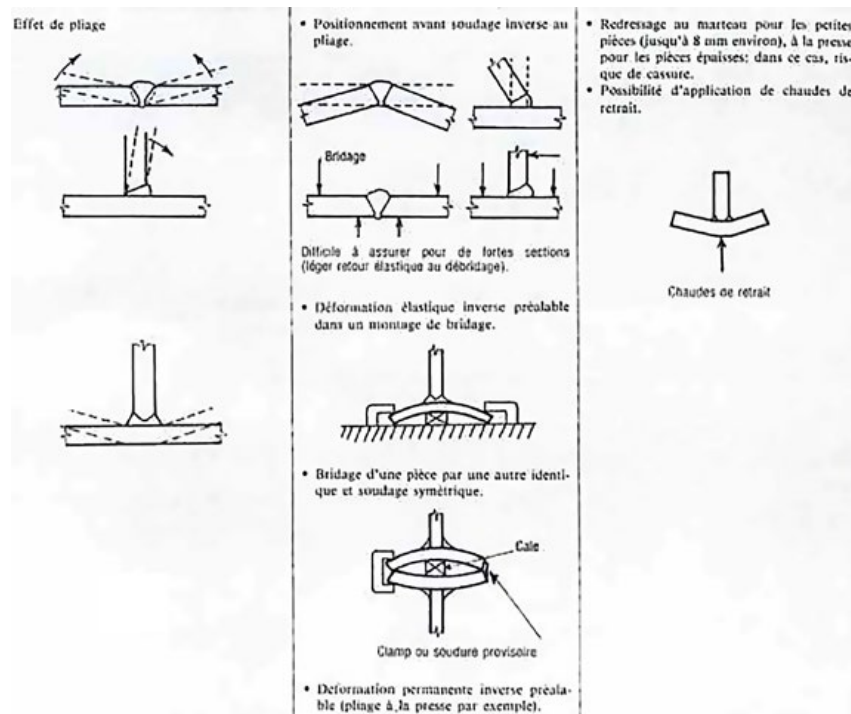


Fig. 110 : Déformations par bridage de soudure (doc. Entreprise Eiffel)

Ces phénomènes génèrent des contraintes résiduelles internes à proximité des cordons qui peuvent entraîner des initiations de fissuration. Ainsi l'Institut International de la Soudure (IIS) a été amené à classifier les dispositions constructives en fonction du degré de bridage.

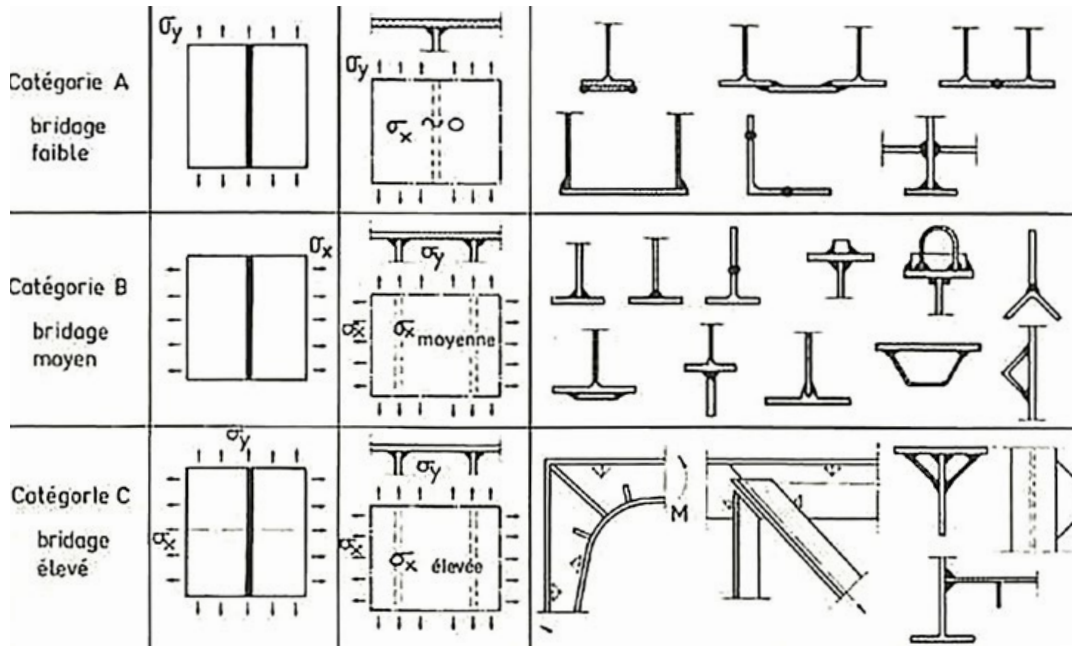


Fig. 111 : Exemples de différents cas de bridage (d'après IIS - IX61042-77).

Dans le cas de réparation d'ouvrages anciens et en présence d'acier à soudabilité non contrôlée, il convient de choisir des dessins d'assemblage simples conduisant à des bridages maîtrisés.

2.2.4 DÉFAUTS MÉTALLURGIQUES AU SOUDAGE (EXTRAIT DE BIBLIOGRAPHIE [6])

2.2.4.1 Fissuration à chaud

La fissuration à chaud est causée par l'action des contraintes de retrait lorsque le métal est encore très chaud après le soudage et que sa ductilité est insuffisante. Elle apparaît donc sans délai et se manifeste sous forme de fissures longitudinales, localisées le plus souvent dans la partie centrale de la zone de métal fondu. Elle peut être amplifiée par la présence d'hydrogène.

> Il est possible d'éviter la fissuration à chaud en veillant aux points suivants :

- composition chimique du métal fondu (mélange de métal de base et de métal d'apport) : les teneurs en soufre et en phosphore doivent être suffisamment faibles et le rapport Mn/S doit être suffisamment élevé (>20), afin d'éviter la formation de composés à bas point de fusion ; les aciers de construction et les métaux d'apport actuels satisfont aisément à ces conditions ;
- configuration du cordon de soudure : la largeur du cordon doit être suffisante par rapport à sa profondeur (rapport recommandé usuellement supérieur à 0,7).

Les incidents de fissuration à chaud sont rares. Ils sont en principe facilement décelables par le contrôle des soudures à la fabrication et les cordons défectueux peuvent être refaits immédiatement.

2.2.4.2 Arrachement lamellaire

L'arrachement lamellaire est une décohésion qui se produit parallèlement au plan de laminage d'un produit, au droit d'un assemblage soudé sollicitant le produit en traction perpendiculairement à sa surface.

Les fissures sont le plus souvent amorcées sur des inclusions. Elles se propagent dans le métal de base, généralement en dehors de la zone affectée thermiquement et suivent un tracé «en marches d'escalier» parallèlement à la limite de la zone fondue (figure 112). Elles peuvent demeurer entièrement sous la surface, ce qui les rend impossibles à détecter par inspection visuelle, ou bien émerger en pied de cordon.

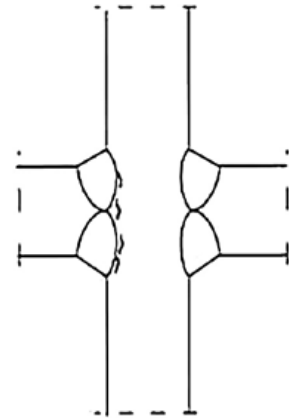


Fig. 112 : Arrachement lamellaire (bibliographie [6]).

> Plusieurs catégories de facteurs peuvent favoriser l'arrachement lamellaire :

- **Acier** : Certains produits laminés, surtout pour les aciers anciens, peuvent avoir une ductilité relativement faible dans la direction perpendiculaire à la surface. En outre, ils peuvent contenir des inclusions non métalliques (sulfures. . .) provenant de l'élaboration en aciérie. Ces inclusions sont aplaties parallèlement à la surface de la tôle lors du laminage, ce qui favorise la décohésion.
- **Conditions de soudage** : ce facteur est lié notamment aux caractéristiques du métal déposé : une limite d'élasticité élevée et une ductilité faible sont défavorables.
- **Dispositions constructives** : l'arrachement lamellaire est à craindre dans les assemblages en T, en croix ou en L comportant des tôles épaisses, des formes lourdes, des soudures à pleine pénétration : le bridage du retrait des soudures, lors du refroidissement, peut provoquer d'importantes contraintes de traction dans le sens transversal de l'élément.
- **Charges appliquées** : des efforts de traction provoqués par les charges peuvent s'ajouter aux autocontraintes de retrait mentionnées précédemment. La répétition des charges augmente leur nocivité.

Précautions contre l'arrachement lamellaire

Il convient en premier lieu de rechercher une bonne conception des dispositions constructives : il faut éviter, dans la mesure du possible, les dispositions qui sollicitent fortement les tôles en traction perpendiculairement à leur surface.

> Lors de la construction, l'entrepreneur doit prendre certaines précautions quand un risque est prévisible :

- effectuer la soudure avec un métal d'apport ayant une limite d'élasticité si possible égale ou la plus proche de la limite d'élasticité minimum garantie sur le métal de base, pour absorber les déformations ; cette disposition est prescrite dans le fascicule 66 du CCTG (commentaires de l'article 11.5) ; bien entendu, la ductilité de ce métal d'apport doit être la plus élevée possible ;
- choisir le procédé de soudage et l'ordre des séquences pour limiter les contraintes dues au bridage.

Une méthode d'amélioration parfois utilisée consiste à déposer, avant exécution de l'assemblage, du métal d'apport sur la surface de la tôle sollicitée transversalement (rechargement, appelé familièrement «beurrage») ; ce métal d'apport, dont la limite d'élasticité et la ductilité doivent remplir les conditions qui viennent d'être indiquées pour les cordons de soudure, absorbe les déformations et répartit les contraintes.

Au lieu de déposer simplement ce métal d'apport à la surface de la tôle, il est également possible de gouger la tôle avant de la recharger, ce qui augmente l'épaisseur de matériau ductile et élimine les inclusions éventuelles. Dans le domaine des ponts, cette technique est appliquée à des tôles dont l'épaisseur ne dépasse pas 20 mm ; le gougeage est effectué sur la moitié environ de l'épaisseur de la tôle.

Dans tous les cas, l'entrepreneur doit appliquer un mode opératoire dont il possède la qualification.

En ouvrage neuf il est fait recours à des aciers **à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface**, dits **aciers Z** en raison de la notation adoptée pour le taux de striction.

L'entrepreneur peut aussi contrôler par ultrasons, avant soudage, l'absence de délaminage ou d'inclusion dans la tôle à l'emplacement de la soudure.

Les aciers modernes (du moins ceux certifiés) ont une faible teneur en soufre et un haut degré de propreté inclusionnaire, de sorte qu'en fait, une grande partie de ces produits satisfait aux critères de la qualité Z15, même en l'absence d'exigence particulière.

2.2.4.3 Fissuration à froid

La fissuration à froid, ou fissuration différée, est l'incident le plus redouté parmi ceux liés à un défaut de soudabilité. Elle se produit sous les cordons de soudure, dans les zones affectées thermiquement, du moins dans le cas des aciers classiques, c'est-à-dire à l'état normalisé (fig. 103).

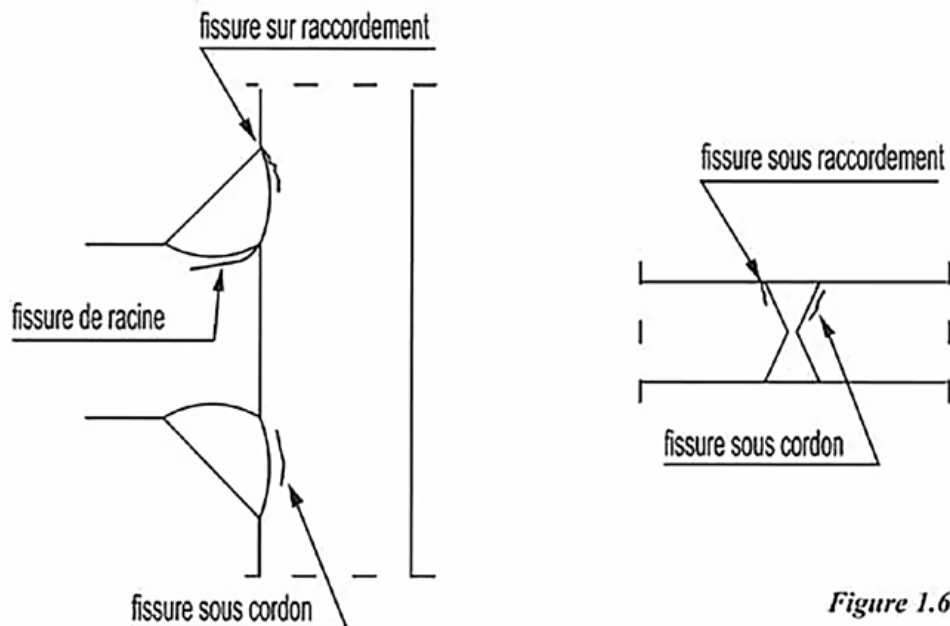


Fig. 113 : Fissuration à froid (bibliographie [6]).

Figure 1.6

> **Son mécanisme résulte de l'action de l'hydrogène sur une microstructure métallographique fragile soumise à des contraintes. Il y a donc trois sortes de facteurs, liés respectivement à l'acier, à l'état de contraintes des pièces et aux conditions de soudage :**

- Acier de base (ou métal fondu) ayant un carbone équivalent élevé et contenant des impuretés. Il peut en résulter une structure métallographique fragile de type martensitique après soudage, si le refroidissement est trop rapide.
- Contraintes de traction élevées dans la zone affectée thermiquement par le soudage (bridage du retrait).
- Présence d'hydrogène dans le cordon de soudure. Cet hydrogène provient de la décomposition, dans l'arc électrique, de l'humidité contenue dans les enrobages et dans les flux (eau résiduelle de fabrication, reprise d'humidité après l'ouverture du paquet...). Il provient aussi, dans une moindre mesure, de l'humidité contenue dans l'atmosphère de soudage et de celle éventuellement présente sur les pièces à souder.

L'hydrogène naissant monoatomique est retenu en solution sursaturée dans la zone de métal fondu. Cet hydrogène est «diffusible», c'est-à-dire que, après refroidissement, il tend à diffuser du métal fondu vers la zone affectée thermiquement. S'il y a formation de martensite, cet hydrogène se concentre dans les dislocations du réseau de la structure métallographique et donne lieu à de fortes pressions locales qui s'ajoutent aux contraintes de bridage. Une fissuration peut s'amorcer grâce à la faible ténacité de la martensite et progresser durant quelques heures ou quelques jours après le soudage, jusqu'à ce que la concentration locale d'hydrogène ait suffisamment diminué.

Précautions contre la fissuration à froid : dispositions concernant les matériaux

En ce qui concerne l'acier de base, diverses dispositions visant à prémunir contre la fissuration à froid sont imposées dans les normes, dans le CCTG et au moyen des certifications.

Les normes de produits indiquent, à titre optionnel, des valeurs maximales du carbone équivalent. Le projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG contient une clause imposant le respect de ces valeurs maximales.

> **D'autre part, des essais permettent d'évaluer l'aptitude d'un acier au soudage :**

- l'essai de fissuration sur implant permet de quantifier la sensibilité de l'acier de base au risque de fissuration, en fonction de la teneur en hydrogène du métal d'apport ;
- la mesure de la dureté de la zone affectée thermiquement («dureté sous cordon») en fonction d'un paramètre caractérisant le refroidissement permet d'évaluer la tendance de l'acier à générer des structures dures, donc fragiles.

De tels essais et des résultats minimaux sont requis dans le cadre de la certification NF-Acier.

En ce qui concerne les produits pour soudage, des conditions sur leurs caractéristiques mécaniques et sur leur teneur en hydrogène sont aussi à respecter. L'utilisation de tôles en acier thermomécanique amoindrit le risque de fissuration à froid dans la zone affectée thermiquement, composée de métal de base ; mais le risque demeure dans la zone de métal fondu, composée de métal de base et de métal d'apport (la composition des produits d'apport ayant moins évolué que les aciers eux-mêmes, le risque de fissuration à froid peut être reporté dans

la zone de métal fondu). Pour bénéficier des avantages des aciers thermomécaniques, il convient d'utiliser des produits d'apport à basse ou très basse teneur en hydrogène, comme spécifié dans le fascicule 66 du CCTG (article II.5.2).

Précautions contre la fissuration à froid : conception et exécution des assemblages

> Lors de la conception et de l'exécution des assemblages soudés, l'entrepreneur doit prendre certaines précautions :

- Minimiser les contraintes dues au bridage, en étudiant la conception des assemblages (qui ne doivent pas être excessivement rigides), la géométrie des chanfreins, les modalités de soudage (ordre de soudage, etc.).
- Éviter les apports d'hydrogène dans le bain de fusion (en respectant les recommandations des fabricants de produits consommables concernant le stockage de ces produits à l'abri de l'humidité et leur étuvage avant utilisation ; en veillant à ce que les pièces à souder soient propres et sèches).
- Diminuer, si nécessaire, la vitesse de refroidissement après soudage, dans la plage de 800 à 500°C, afin d'éviter la formation de structure martensitique fragile.

Le moyen habituellement utilisé pour diminuer la vitesse de refroidissement est le préchauffage, qui consiste à chauffer avec des chalumeaux ou une rampe à gaz, à une température déterminée, une certaine zone autour de l'assemblage avant de souder et à maintenir cette température pendant le soudage. Outre l'effet sur la vitesse de refroidissement, le préchauffage disperse l'hydrogène de la zone affectée thermiquement. La température de préchauffage est déterminée à l'aide d'abaques dans lesquels sont introduits les différents paramètres ; elle peut atteindre 150 C°.

Un préchauffage est toujours nécessaire avec les aciers à l'état normalisé de nuance S 355 et au dessus. Ses conditions doivent être définies dans le descriptif du mode opératoire de soudage et validé par la qualification du mode opératoire de soudage (QMOS). Les aciers à l'état thermomécanique permettent souvent de se dispenser de préchauffage.

Parfois, en complément du préchauffage, un post-chauffage est effectué durant quelques heures : l'hydrogène s'élimine par diffusion tant que l'acier est à la température de post-chauffage ; en outre, la vitesse de refroidissement est encore diminuée.

Il est également possible de bâcher ou installer toute autre sorte d'abri comme disposition complémentaire. La température ambiante joue évidemment un rôle : plus la température d'ensemble des éléments est basse, plus la zone soudée se refroidit rapidement par conduction. La norme NF P 22-471, article 8.2.1, interdit les travaux de soudage quand la température au poste de travail est inférieure à - 5°C.

Le risque de fissuration à froid dépend aussi du procédé de soudage: il existe avec le soudage à l'électrode enrobée. Le procédé sous flux peut être utilisé au chantier (peu en réparation) lorsque la conception de la structure s'y prête (ex : platelage supérieur du viaduc de Millau et de la Grande Ravine). La fissuration à froid est moins sensible avec ce procédé sous réserve d'étuver la poudre.

2.2.5 TECHNIQUES DE SOUDAGE (EXTRAIT DE BIBLIOGRAPHIE [6])

2.2.5.1 Types d'assemblages soudés, types de soudures

> On distingue divers types d'assemblages soudés, caractérisés par la position des pièces assemblées l'une par rapport à l'autre. Dans le cas des ponts, sont uniquement utilisés :

- les assemblages bout à bout ;
- les assemblages en T (ou en croix, ou en L).

> Pour les soudures proprement dites, il faut distinguer, suivant la terminologie de l'eurocode 3 (voir tableau XIV ci-après) :

- les soudures d'angle ;
- les soudures en bout.

Les soudures d'angle, au sens de l'eurocode 3, sont les soudures déposées sur la surface des pièces assemblées, sans chanfreinage des bords, dans les assemblages en T, en croix, ou en L. Elles étaient appelées «soudures d'angle sans chanfrein» dans les normes françaises antérieures à l'eurocode.

Les soudures d'angle sont utilisées par deux, une sur chaque face de la tôle assemblée. On admet cependant d'avoir une soudure unique si les trois conditions sont réunies : le côté non soudé du joint ne tend pas à s'ouvrir sous les efforts appliqués, il n'est pas accessible au soudeur, il est à l'intérieur d'une partie fermée non exposée à la corrosion atmosphérique. L'assemblage d'un raidisseur tubulaire à une tôle est un exemple de ce cas.

Les soudures en bout, au sens de l'eurocode 3, sont celles disposées dans l'épaisseur des tôles assemblées, que la pénétration soit partielle ou totale. Elles nécessitent généralement une préparation du bord des pièces par chanfreinage.

Il faut donc retenir que, suivant la terminologie des normes européennes, une «soudure d'angle» est effectuée sans chanfrein, alors qu'une «soudure en bout», au contraire, nécessite généralement un chanfrein, sans toutefois que cette correspondance soit systématique.

Le tableau XIV reproduit cette classification. Il est extrait de l'eurocode 3, partie 1-1, en conservant seulement ce qui concerne les ponts. Les chanfreins sont représentés à titre indicatif ; de nombreuses autres formes géométriques sont pratiquées.


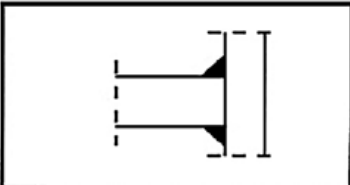
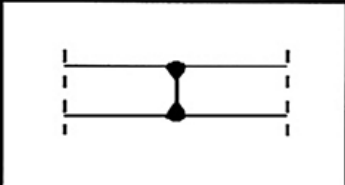
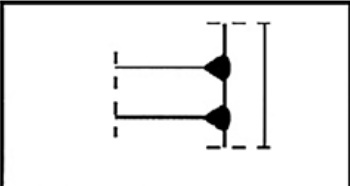
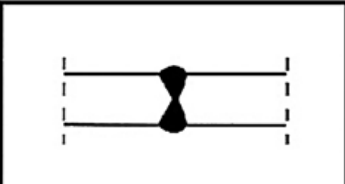
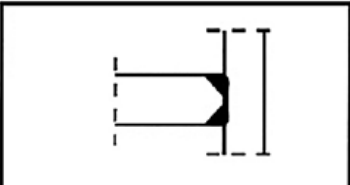
Types de soudures	Types d'assemblage	
	assemblages bout à bout	assemblages en T en croix ou en L
soudure d'angle (sans chanfrein)		
soudure en bout à pénétration partielle		
soudure en bout à pleine pénétration		

Tableau XIV : Classification des soudures et des assemblages soudés suivant l'eurocode 3.

Pour le calcul à la fatigue, on doit utiliser, aussi bien pour les ponts-routes que pour les ponts-rails, le Guide fatigue (bibliographie [19]), qui s'appuie sur l'eurocode 3, partie 1.

2.2.5.2 Choix de la classe de qualité des assemblages soudés :

> POUR LES OUVRAGES CONSTRUITS AVANT LA PARUTION DE LA NORME NF EN 1090-2 :

> Le fascicule 66 (article 111.5.3) fixe le classement minimal des assemblages soudés :

- la classe de qualité 1 est à retenir pour les assemblages transversaux tendus en situation d'exploitation, sous charge de calcul à l'état-limite de service, des membrures de poutres principales des tabliers de ponts ; les membrures s'entendent au sens large : semelles de poutres (y compris rails de lançage soudés sous les poutres et laissés en place), fonds de caissons, dalles orthotropes ;
- la classe de qualité 2 est à retenir pour tous les autres assemblages soudés des structures porteuses, y compris ceux fixant des éléments accessoires à la structure (pour éviter que des défauts de soudure ne se transmettent à la structure) ;

- la classe de qualité 3 ne peut être utilisée que pour des assemblages soudés entre éléments accessoires ne participant pas à la résistance ni à la stabilité de la structure.

Le fascicule 66 du CCTG donne ce classement comme une base minimale, que le CCTP du marché doit compléter, s'il y a lieu, en spécifiant une classe de qualité plus sévère pour certains assemblages.

> **Il y a lieu par exemple de spécifier pour un assemblage la qualité 1 à la place de la qualité 2 :**

- lorsque cet assemblage est vital pour la sécurité de l'ouvrage ; un tel cas est exceptionnel (le fascicule 66 cite comme exemple des assemblages transmettant en traction les réactions des haubans dans un pont à haubans) ;
- lorsqu'on a besoin de la classe de fatigue 71 pour un assemblage en T, en croix ou en L, avec soudures à pleine pénétration transmettant des efforts ; la qualité 2 ne donne droit qu'à la classe 56, comme indiqué en 2.2.2 ci-avant (pour les autres assemblages, la qualité 1 n'apporte aucun avantage utilisable dans les calculs à la fatigue, par rapport à la qualité 2).

En dehors de ces cas particuliers, il est conseillé de ne pas imposer la qualité 1 plus que ne le prévoit le fascicule 66. La qualité 1 augmente fortement le coût de fabrication des assemblages. En outre, les critères d'acceptation des imperfections sont sévères, ce qui conduit assez souvent à des réparations, lesquelles peuvent entraîner des risques plus importants que la non-élimination du défaut. La norme NF P -22-471 (article 10.2) rappelle ce point.

Le CCTP peut spécifier aussi un «surclassement» en qualité 2 pour certains assemblages entre éléments accessoires, au lieu de la classe 3 qui résulterait de l'application à la lettre du fascicule 66. Il est conseillé de procéder ainsi pour tous les assemblages dont la rupture pourrait mettre en danger des personnes, qu'il s'agisse d'usagers ou bien d'agents d'exploitation ou de maintenance. Des soudures concernées sont par exemple celles conditionnant la tenue des dispositifs de visite et d'entretien.

Ces règles ont été établies pour les tabliers de ponts. Elles peuvent habituellement être étendues aux passerelles pour piétons et cycles, non mentionnées dans le fascicule 66.

Dans le domaine ferroviaire, où les conditions d'exploitation des ouvrages sont plus contraignantes, des règles plus sévères sont appliquées.

> **POUR LES OUVRAGES CONSTRUITS APRÈS LA PARUTION DE LA NORME NF EN 1090-2 :**

La norme NF EN 1090-2 introduit une classification d'exigences en ce qui concerne l'exécution proprement dite, les tolérances géométriques ou l'organisation de la qualité, caractérisée par **des classes d'exécution** qui s'apparentent aux classes déjà indiquées dans les normes françaises de construction métallique.

Quatre classes d'exécution sont prévues. Il est important de noter que cette classification peut s'appliquer à l'ensemble de la structure, à une partie de la structure ou à des détails spécifiques. Un guide de choix de la classe d'exécution est actuellement en préparation. Les principes du choix reposent sur deux critères : la classe de conséquences et la catégorie d'exécution et de service.

Les classes de conséquences (CC) sont empruntées à l'Annexe B à l'eurocode O – EN 1990 **Base de calcul des structures**.

> Les classes de conséquences sont définies dans le tableau ci-après :

Classes de Conséquences	Description	Exemples de bâtiments et de travaux de génie civil
CC3	Conséquence élevée en terme de perte de vie humaine, ou conséquences économiques, sociales ou d'environnement très importantes	Tribunes, bâtiments publics où les conséquences de la défaillance seraient élevées (ex. : salle de concert)
CC2	Conséquence moyenne en terme de perte de vie humaine, ou conséquences économiques, sociales ou d'environnement considérables	Bâtiments résidentiels et de bureaux, bâtiments publics où les conséquences de la défaillance seraient moyennes (ex. : immeuble de bureaux)
CC1	Conséquence faible en terme de perte de vie humaine, ou conséquences économiques, sociales ou d'environnement faibles ou négligeables	Bâtiments agricoles normalement inoccupés (ex. : bâtiments de stockage), serres

Tableau XV : Classes de conséquences selon pr NF EN 1090-2.

Les catégories d'exécution et de service évaluent les dangers potentiels liés à l'exécution ou aux conditions de service.

> Trois catégories d'exécution et de service sont proposées selon le tableau ci-après :

Catégories	Critères
PS3	Éléments pour lesquels une vérification à la fatigue est exigée (Cf. définition donnée dans l'EN 1993-1-1).
PS2	Éléments non concernés par les exigences PS3 mais par l'une, au moins, des conditions suivantes : Température de service des éléments < -20 °C, Éléments soudés en acier S355 en épaisseur : > 50 mm pour les qualités M et ML et > 25 mm pour les autres qualités, Éléments principaux assemblés par soudage sur site, Éléments formés à chaud ou soumis à un traitement thermique, Éléments de structures treillis en profils creux avec découpe d'extrémité des profils, Éléments de poutres de roulement de ponts roulants, Éléments avec surfaces d'appui par contact direct, Éléments de structures en zone sismique.
PS1	Bâtiments agricoles normalement inoccupés (ex. : bâtiments de stockage), serres

Tableau XVI : Catégories d'exécution selon pr NF EN 1090-2.

Les classes d'exécution sont ensuite choisies en fonction des classes de conséquences et des catégories d'exécution et de service retenues pour les éléments considérés.

> Elles peuvent être choisies sur la base des indications du tableau ci-après :

Catégories d'exécution et de service	Classes de conséquences		
	CC3	CC2	CC1
PS3	EXC4	EXC3	EXC3
PS2	EXC3	EXC2	EXC2
PS1	EXC3	EXC2	EXC1

Tableau XVII : Classes d'exécution selon pr NF EN 1090-2.

A noter que les données ci-dessus sont données à titre indicatif et sujettes à modifications jusqu'à la parution de la norme.

2.2.5.3 Les procédés de soudage (extrait de bibliographie [6])

2.2.5.3.1 Principes généraux

Les procédés de soudage des métaux sont nombreux et basés sur des techniques très diverses.

Cependant, dans le domaine des ponts en acier et plus particulièrement en réparation, on utilise uniquement le soudage à l'arc et les principes de base adoptés sont toujours les mêmes, à quelques exceptions près : l'arc électrique est entretenu entre une électrode et les éléments à souder ; il y a fusion du métal de base, ainsi que de l'électrode ; celle-ci est donc consommable et fournit du métal, dit métal d'apport. Le soudage à l'arc nécessite une protection contre l'air : à la température de fusion, le fer se combine avec les constituants de l'air (oxygène et azote) pour donner des oxydes et des nitrures qui rendraient la soudure extrêmement fragile. Cette protection est assurée par des produits introduits sous différentes formes : enrobage des électrodes, flux en poudre, garnissage intérieur des fils-électrodes, gaz... C'est essentiellement par le mode de protection que se différencient les procédés de soudage des constructions métalliques.

> Deux procédés de soudage à l'arc utilisés pour les structures métalliques font exception à ces principes :

- le soudage des goujons de ponts mixtes, dans lequel l'arc est entretenu entre le goujon et la tôle support, sans utilisation d'électrode ni apport de métal ;
- le soudage TIG, utilisé exceptionnellement pour les ouvrages d'art, dans lequel le métal d'apport est fourni en dehors de l'électrode, laquelle n'est donc pas fusible (c'est le cas de la refusion TIG utilisée en amélioration de la géométrie des cordons vis-à-vis de la fatigue).

Le procédé de soudage est choisi par l'entrepreneur.

Nous indiquons ci-après les procédés utilisés pour les ponts, en mentionnant pour chacun d'eux le numéro d'identification suivant la norme NF EN 24063 : cette norme fournit un classement systématique des procédés de soudage des métaux, avec pour chacun une désignation normalisée et un numéro d'identification. Dans le cas des réparations d'ouvrages nous nous limiterons aux procédés utilisés sur site. La préparation des pièces en atelier sur aciers actuels relève de la construction métallique classique.

2.2.5.3.2 Soudage à l'arc avec électrode enrobée (n° 111 de la norme)

C'est la première solution mise au point pour le soudage à l'arc, utilisée dès 1907. Il s'agit d'un procédé manuel : le soudeur tient et guide à la main le porte-électrode (figure 114).

Les électrodes sont constituées d'une âme métallique et d'un enrobage. Le diamètre, enrobage compris, est de l'ordre de 6 mm.

L'âme conduit le courant électrique et fond en fournissant le métal d'apport.

> **L'enrobage fond en même temps. Sa composition est complexe (produits minéraux, métalliques et organiques), car il doit assurer plusieurs fonctions :**

Fonctions chimiques et métallurgiques :

- produire des gaz (par exemple, gaz carbonique par décomposition de carbonates) pour protéger le bain de fusion des effets de l'oxygène et de l'azote atmosphériques,
- épurer le bain de fusion par apport d'éléments désoxydants et dénitrateurs,
- fournir au métal déposé, si nécessaire, des éléments d'alliage pour améliorer ses caractéristiques mécaniques ;

Fonctions physiques :

- former par fusion un laitier liquide qui se solidifie à la surface du métal déposé, lui apportant une protection physico-chimique, en particulier le protégeant d'un refroidissement trop rapide qui entraînerait un risque de fragilisation par trempe,
- favoriser l'amorçage et la stabilité de l'arc,
- canaliser les gouttelettes de métal fondu, grâce au jet de gaz incandescent produit, ce qui est utile en particulier lorsqu'il faut souder en position verticale, au plafond...

Il existe plusieurs natures d'enrobage : basique, rutile, ... C'est l'enrobage basique qui doit être utilisé pour les aciers de nuance S355 et au-dessus (fascicule 66 du CCTG, article II.5.2) : il permet les meilleurs résultats en ténacité, en ductilité, et en faible teneur en hydrogène diffusible à condition d'être convenablement séché.

Ces électrodes nécessitent du courant continu.

L'enrobage basique ayant tendance à absorber de l'humidité (nocive parce qu'elle fournit de l'hydrogène au bain de fusion), il est nécessaire de prévoir un cycle d'étuvage dans un four adapté et la conservation pendant le poste de travail avec un carcan chauffé (80 – 100°C) en se conformant aux instructions du fabricant.

Il existe aussi maintenant des électrodes à enrobage basique livrées sous vide dans des étuis étanches, qui peuvent être utilisées sans séchage préalable pendant un certain temps après ouverture de l'étui. Les électrodes non utilisées pendant le délai imparti peuvent être utilisées ultérieurement après avoir suivi le même étuvage que les produits classiques.

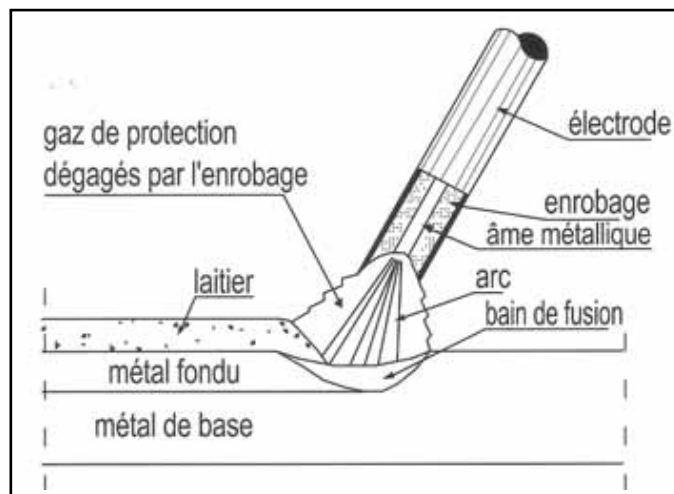


Fig. 114 : Principe du soudage à l'arc avec électrode enrobée (bibliographie [6]).

Le soudage à l'électrode enrobée ne nécessite qu'un équipement peu coûteux. Il est relativement simple à mettre en œuvre, le soudeur n'ayant que deux paramètres à régler : la tension et l'intensité du courant. Il permet de réaliser les différents types d'assemblages dans toutes les positions de soudage, avec une bonne liberté de mouvement et pour une large gamme d'épaisseurs.

Il est utilisé en atelier et surtout sur chantier (il a été longtemps le seul procédé possible sur chantier).

Son inconvénient est un coût de main d'œuvre élevé : le taux de dépôt peut être deux ou trois fois plus faible qu'avec d'autres procédés ; le facteur de marche est faible également, car il faut insérer fréquemment une nouvelle électrode, ce qui est pénalisant avec les soudures longues. Le soudage à l'électrode enrobée n'est donc adopté que lorsque les procédés plus productifs ne peuvent pas être utilisés, par exemple parce que la zone de soudage est d'accès difficile et sur des longueurs peu importantes.

2.2.5.3.3 Soudage à l'arc avec fil-électrode fusible fourré, sans protection de gaz (n° 114 de la norme)

Le procédé «Innershield» (appellation commerciale propre à la Société Lincoln Electric) appartient à cette catégorie. Mis au point vers 1959, il a été appliqué pour la première fois à un ouvrage d'art (en France) pour la reconstruction du pont de Sully-sur-Loire, en 1986. Depuis, il est couramment utilisé pour les ponts-routes comme pour les ponts-rails.

Il utilise un fil-électrode continu qui fournit le métal d'apport. Ce fil, creux, contient un garnissage qui remplit les mêmes fonctions que l'enrobage des électrodes enrobées. Le diamètre extérieur du fil est compris habituellement entre 1,8 et 2 mm (figure 115). Il n'y a pas à effectuer d'étuvage : le fil creux contenant le garnissage est généralement étanche.

Le procédé est semi-automatique : le soudeur guide à la main, le long du joint, un pistolet qui débite à vitesse constante le fil provenant d'un dévidoir. Les paramètres à régler avant soudage sont la tension électrique, la longueur de fil sortie du pistolet et la vitesse de déroulement du fil.

La protection est plus localisée que dans le cas des autres méthodes avec fil et protection gazeuse, ou que dans le cas de l'électrode enrobée (le fil contient moins de garnissage que l'électrode ne comporte d'enrobage). Le soudeur doit donc être formé spécialement et, bien entendu, avoir la qualification pour le procédé et pour les positions de soudage nécessaires.

Du fait qu'il n'y a aucun apport de gaz de protection (en dehors de celui fourni par le garnissage), le procédé est peu sensible au vent. Il peut donc être pratiqué sur chantier, avec seulement un minimum de précautions pour s'abriter du vent. L'utilisation est possible pour les différents types d'assemblages, dans toutes les positions de soudage. Le procédé a donc des possibilités analogues à celles du soudage à l'électrode enrobée, tout en permettant un taux de dépôt plus élevé.

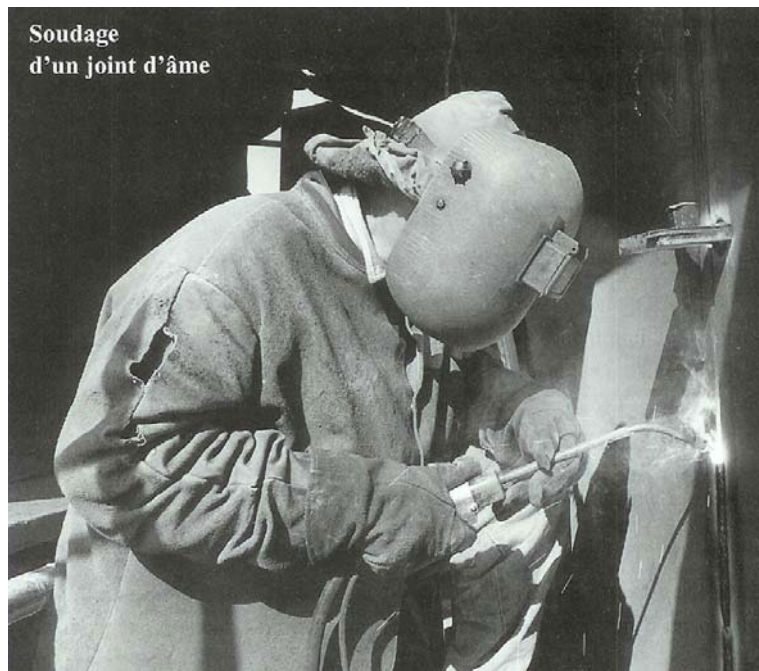
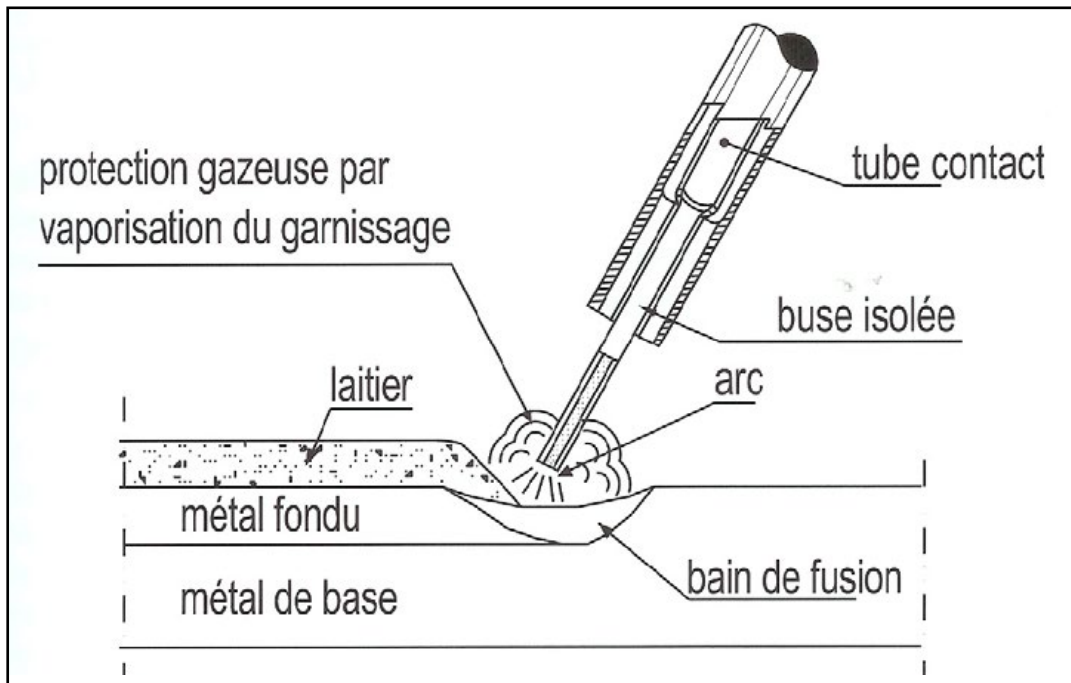


Fig. 115 a et b : Soudage à l'arc avec fil fourré (bibliographie [6]).

2.2.5.3.4 Soudage à l'arc des goujons (n° 784 de la norme)

Les goujons de connexion des ponts mixtes peuvent avoir un diamètre jusqu'à 22 mm maximum et doivent être conformes à la norme EN ISO 13918. Le soudage doit être réalisé selon la norme NF EN ISO 14555.

L'opérateur conduit le soudage à l'aide d'un pistolet dans lequel est maintenu le goujon à souder. Le pistolet est connecté à l'alimentation électrique de façon à ce que le goujon joue le rôle d'électrode.

Le pistolet comporte des dispositifs mécaniques et électroniques qui commandent automatiquement le passage du courant électrique et les mouvements nécessaires. Avant le soudage, les réglages sont effectués par l'opérateur en conformité avec le descriptif du mode opératoire de soudage.

> Les trois phases représentées à la figure 116 correspondent aux opérations suivantes :

- Positionnement du goujon par l'opérateur, avec le pistolet, sur la membrure support ; le ressort est comprimé par la remontée du goujon.
- Après déclenchement du pistolet, nouvelle remontée du goujon, par un électro-aimant, de la hauteur R nécessaire à l'obtention de la bonne longueur d'arc ; amorçage de l'arc ; fusion de la tôle et de l'extrémité inférieure du goujon.
- Interruption du courant ; enfoncement du goujon, par l'action du ressort, dans le métal fondu.

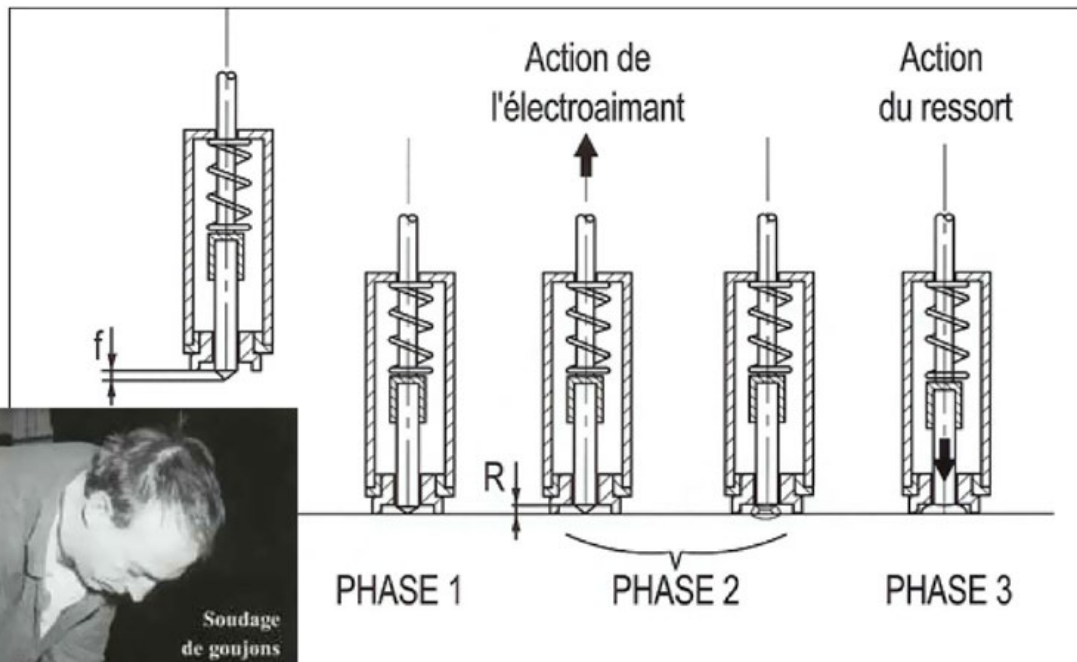
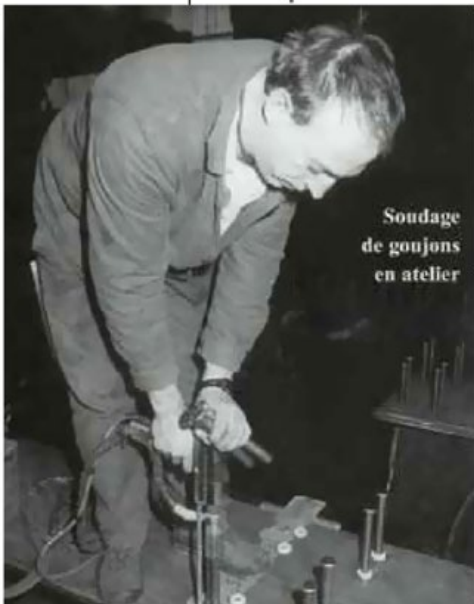


Fig. 116 a et b : Soudage des goujons (bibliographie [6]).



La bague en matériau réfractaire assure une protection par confinement qui limite l'oxydation et maintient le métal fondu. Elle doit être éliminée après le soudage.

Le soudage des goujons est le plus souvent exécuté en atelier. Si nécessaire, le procédé est utilisable sur chantier à condition de disposer d'un groupe électrogène puissant et à réponse rapide.

2.2.5.4 Choix des produits consommables pour soudage (extrait de bibliographie [6])

L'entrepreneur utilise, pour la construction, des produits consommables (électrodes, fils électrodes,...) conformes au descriptif des modes opératoires de soudage. C'est donc lors de la mise au point du mode opératoire qu'il choisit les produits.

Le choix des produits doit être conforme aux spécifications du CCTG et des normes ; ces spécifications concernent les caractéristiques mécaniques du métal d'apport, la nature des produits (rutil ou basique), la teneur en hydrogène diffusible.

Pour les caractéristiques mécaniques (limite d'élasticité, résistance à la traction, allongement à la rupture, énergie de rupture par choc dans l'essai Charpy V) le principe général est que les valeurs nominales du métal d'apport doivent être égales ou supérieures aux valeurs spécifiées du métal de base (fascicule 66 du CCTG, article 11.5, et eurocode 3, partie 1.1, article 3.3.5).

Les valeurs nécessaires sont facilement obtenues pour les caractéristiques de traction, du moins avec les nuances d'acier utilisées couramment. Pour les aciers modernes il est plus difficile d'obtenir l'énergie de rupture par choc, les valeurs de l'acier de base étant relativement élevées dans le cas des fortes épaisseurs.

S'il y a risque d'arrachement lamellaire, le fascicule 66 du CCTG (commentaire de l'article 11.5) spécifie que la limite d'élasticité du métal d'apport ne soit pas supérieure à celle du métal de base : les limites d'élasticité doivent donc être égales dans ce cas. Cette condition ne peut être satisfaite que pour les aciers de base de nuance S355 et au-dessus : il n'existe pas, actuellement, de métal d'apport ayant une limite d'élasticité inférieure à 320 N/mm².

Il est à noter que les caractéristiques mécaniques du métal d'apport sont mesurées sur des éprouvettes confectionnées en déposant du métal dans un moule. Les valeurs garanties par le fabricant de produit portent sur ce métal déposé, qui n'est influencé par aucun enrobage ni flux et qui n'est pas dilué dans le métal du moule. Ce sont donc des valeurs conventionnelles, qui peuvent différer sensiblement de celles obtenues réellement sur les assemblages soudés. L'entrepreneur doit en tenir compte lors du choix des produits et de la mise au point de ses modes opératoires.

En ce qui concerne la nature des produits, le fascicule 66 (article 11.5) spécifie, pour le soudage des aciers de nuance S355 et au-dessus, des produits de nature basique, à basse ou à très basse teneur en hydrogène suivant l'épaisseur des pièces à assembler. Ces produits d'apport justifient de conditions de préparations et de stockage strictes de façon à éviter une prise d'humidité des enrobages fortement hygroscopiques. C'est seulement pour les aciers de nuance S235 et S275 en faible épaisseur qu'il autorise les produits rutils.

Enfin, le fascicule spécifie, pour le soudage des aciers «autopatinables», des produits d'apport ayant une tenue à la corrosion atmosphérique similaire à celle de l'acier de base. Dans le cas des soudures multipasses, cette exigence est limitée au nombre de passes superficielles permettant d'obtenir une profondeur suffisante de protection contre la corrosion.

2.2.5.5 Les défauts des soudures (extrait de bibliographie [6])

> Les défauts des soudures peuvent être nocifs de différentes façons. Ils peuvent :

- affaiblir la résistance statique de l'assemblage;
- initier une fissure de fatigue;
- provoquer une rupture fragile, si d'autres facteurs défavorables sont réunis.

La nocivité des défauts dépend de leur taille et de leur forme géométrique. Une forme de défaut est d'autant plus nocive à l'égard de la rupture fragile qu'elle produit un effet d'entaille plus marqué. Il est possible de classer les défauts en cinq groupes suivant la norme NF EN ISO 5817 **Classement des défauts dans les soudures par fusion des métaux** :

1. **Fissures** - Elles peuvent être dues à de la fissuration à froid ou à chaud. Ce sont les défauts les plus nocifs et toute fissure est interdite quelle que soit la classe de qualité de la soudure.
2. **Cavités** - Il s'agit notamment des soufflures dues à des inclusions gazeuses. Elles sont plus ou moins nocives en elles-mêmes ; elles peuvent aussi gêner la détection d'autres défauts. Les soufflures débouchantes sont interdites dans les classes de qualité 1 et 2, les autres sont tolérées dans certaines limites.
3. **Inclusions solides** - Elles peuvent être constituées de résidu de laitier ou de flux emprisonné dans la soudure. Elles ont les mêmes conséquences que les soufflures.
4. **Manques de fusion ou de pénétration** - Les manques de fusion sont un défaut de liaison entre le métal déposé et le métal de base, ou entre deux couches contigües de métal déposé. Les manques de fusion ou de pénétration sont dus à un mode opératoire inadapté. Comme ils peuvent avoir un effet d'entaille analogue à celui des fissures, ils sont interdits dans les classes de qualité 1 et 2.
5. **Défauts de forme** - Ils peuvent concerner, soit la position des éléments l'un par rapport à l'autre (défaut d'alignement, défaut angulaire...), soit la soudure elle-même (défaut de raccordement des soudures aux éléments, surépaisseur, manque d'épaisseur, effondrement, caniveau, bombement excessif, dissymétrie d'une soudure d'angle, etc.). Les défauts de forme des soudures sont dus soit à un mode opératoire inadapté, soit, dans le cas des soudures d'angle, à une mauvaise tenue de l'électrode ou du pistolet par le soudeur. Les caniveaux sont interdits en classe 1 et limités en classe 2, les manques d'épaisseur sont interdits en classes 1 et 2.

Sur des matériaux anciens, ces défauts peuvent représenter plus de risques que sur les matériaux modernes de meilleure ténacité. En conséquence, le dessin des pièces devra éviter les effets de bridage et les concentrations de contraintes. De plus, il sera porté une attention particulière à l'élaboration et au suivi des DMOS (descriptif de mode opératoire de soudage) et QMOS (qualification de mode opératoire de soudage).

2.2.5.6 Contrôle des soudures

> Comme en contrôle de construction neuve, outre le contrôle visuel, quatre procédés de contrôle non destructif sont pratiqués. Ce sont, en allant du plus superficiel au plus pénétrant :

- le ressuage
- la magnétoscopie
- la radiographie, par rayons X ou par rayons gamma
- les ultrasons.

Ces procédés permettent non seulement de détecter les défauts, mais aussi d'obtenir des indications sur leur taille, leur forme, leur orientation et leur situation dans la soudure. Ils sont complémentaires, chacun d'eux n'étant utilisable que pour certains types de défauts et certains types de soudures.

Le contrôle des soudures doit être effectué avant application de la protection contre la corrosion, bien que certains procédés puissent être utilisés sur surface peinte sous réserve d'une épaisseur maximum de 150 à 200 µm. Cela est à éviter surtout pour le contrôle par ultrasons.

En réparation, l'utilisation des différentes techniques de contrôle et l'étendue de ces dernières sont analogues au domaine de la construction au neuvage. Ces techniques sont développées dans le guide *Travaux de construction en acier - Guide du Maître d'œuvre* du SETRA (2001) (bibliographie [6]) auquel nous renvoyons le lecteur.

2.2.6 L'EXÉCUTION DES TRAVAUX

L'exécution des travaux de réparation est analogue à la réalisation des ouvrages au neuvage avec des travaux d'atelier et sur site. Les procédures de qualifications sont aussi analogues. Nous renvoyons le lecteur au document du SETRA *Travaux de construction en acier - Guide du Maître d'œuvre (2001)* (bibliographie [6]) pour plus de détails sur ces phases. La fiche MEMOAR n°XVII-2 du SETRA (bibliographie [26]) en fait également une présentation synthétique actualisée.

2.2.6.1 Soudage : qualifications

La qualification des modes opératoires de soudage (QMOS) est définie dans la norme NF EN ISO 15614-1 en remplacement de la NF EN 288, parties 1 à 3, qui s'applique aux constructions métalliques de toutes natures, et dans la norme NF P 22-472, qui donne les règles d'application pour le bâtiment et le génie civil.

Le descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) fait référence à la qualification et indique de façon précise et détaillée les différents paramètres de l'épreuve. Le cadre-type figure en annexe de la norme NF EN ISO 15609-1.

La qualification des soudeurs fait l'objet de la norme NF EN 287-1 : *Epreuve de qualification des soudeurs - soudage par fusion* - partie 1 : Aciers.

2.2.6.2 Soudage : Documents fournis par l'entrepreneur

Outre les documents de qualification ci-dessus, l'entrepreneur doit fournir **un programme de soudage** pour tous les assemblages soudés de classe de qualité 1 ou 2 (norme NF P 22- 471), y compris pour l'assemblage d'éléments provisoires à la structure (fascicule 66 du CCTG, article III.6). La consistance du programme de soudage est définie dans la norme NF P 22-471 (article 7), à laquelle renvoie le fascicule 66 du CCTG (article III. 1.5.3).

La **description des soudures** et les modalités d'exécutions sont généralement fournies sous la forme d'un cahier comportant le schéma de tous les types d'assemblages soudés prévus pour l'ouvrage.

Le **cahier de contrôles** est établi par l'entrepreneur à partir de réductions de plans d'exécution ou de schémas ; il indique la nature et l'étendue des contrôles non destructifs prévus pour chaque assemblage soudé de l'ouvrage (fascicule 66 du CCTG, article III. 1.5.3). L'entrepreneur doit compléter ce document au fur et à mesure de l'exécution en y mentionnant, pour chaque assemblage soudé, l'emplacement précis des contrôles effectués et, pour chaque contrôle, un numéro permettant d'identifier le procès-verbal de contrôle correspondant.

Après soudage, l'entrepreneur remet au maître d'œuvre ceux des documents du programme de soudage qui ont été mis à jour ou complétés au cours des travaux (cahier des soudures, cahier des contrôles).

Au titre du PAQ, l'entrepreneur remet les documents de suivi d'exécution du **Plan d'assurance de la qualité : documents préalables à l'exécution et documents de suivi d'exécution à fournir par l'entrepreneur pour chaque phase de travaux dans les cas courants**.

Tous ces documents doivent être versés par le maître d'œuvre au dossier d'ouvrage.

2.2.6.3 Soudage : Travaux en atelier (extrait de bibliographie [6])

Le maître d'œuvre assure des contrôles avant, pendant et après soudage tels que décrits dans le guide du SETRA **Travaux de construction en acier - Guide du Maître d'œuvre** (2001) (bibliographie [6]), document auquel nous renvoyons le lecteur.

L'acceptation des soudures par le maître d'œuvre est mentionnée dans la norme NF P 22- 471 (article 11). Le fascicule 66 du CCTG (article III.5.6) l'impose pour les assemblages soudés de classe 1 ou 2.

Le visa par le maître d'œuvre du procès-verbal d'acceptation des assemblages soudés effectués en atelier est une condition à la levée du point d'arrêt avant les phases de travaux ultérieures : mise en œuvre de la protection contre la corrosion, transport des éléments de l'atelier sur le chantier.

2.2.6.4 Soudage : Travaux sur chantier (extrait de bibliographie [6])

En réparation, cette situation est prépondérante.

Les dispositions indiquées pour le soudage en atelier restent valables, mais elles doivent tenir compte des contraintes supplémentaires liées au travail sur chantier.

L'une de ces contraintes est la sujétion aux intempéries. Les postes de soudage doivent être munis d'abri protégeant le soudeur et l'assemblage à souder contre le vent et la pluie. Les produits consommables doivent être conservés selon les recommandations du fabricant. Les électrodes basiques et les flux doivent être étuvés avant utilisation, ce qui nécessite la présence d'une étuve à proximité du lieu de travail des soudeurs. L'humidité, provenant par exemple de la condensation, doit être éliminée des pièces avant soudage.

Les abris peuvent apporter aussi une protection relative contre les basses températures. Les conditions de température des pièces à souder et du poste de travail sont définies dans la norme NF P 22-471 (article 8.2.1).

Le PAQ doit inclure une note sur la protection contre les intempéries.

Une autre contrainte du chantier est l'impossibilité de retourner les pièces comme en atelier. De nombreuses soudures doivent donc être exécutées «au plafond». En outre, les procédés de soudage praticables sur chantier sont moins nombreux qu'en atelier.

Ainsi, les modes opératoires qualifiés utilisés sur chantier sont souvent différents de ceux utilisés en atelier. Les soudeurs doivent donc posséder des qualifications différentes et une expérience confirmée dans les procédés de soudage utilisés (par exemple le procédé Innershield).

Pour ces différentes raisons, l'étendue des contrôles à effectuer par l'entrepreneur est plus importante sur chantier qu'en atelier (norme NF P 22-473)....

2.2.7 RECOMMANDATIONS RELATIVES AUX MATÉRIAUX MÉTALLIQUES ANCIENS

La réparation de matériaux anciens par soudage nécessite la caractérisation du matériau, dont la date de construction est un élément important.

2.2.7.1 Cas du fer puddlé (extrait de bibliographie [4])

Dans le cadre d'une réparation ou d'un renforcement, après caractérisation du matériau constitutif de l'ouvrage, l'emploi de la soudure à l'arc sur fer puddlé est tout à fait admissible à la condition d'appliquer certaines conditions opératoires adaptées à cause de la structure lamellaire et de la forte teneur en impuretés.

> **Le chapitre Soudage du fer puddlé du cours de l'École supérieure du Soudage et de ses Applications (bibliographie [5]) prescrit deux précautions suite à la faible cohésion entre feuilletts et au grand nombre d'inclusions :**

- intéresser une étendue relativement importante des fibres du métal,
- éviter de concentrer la soudure dans une même section (fig. 107)
- souder assez «froid» pour éviter la séparation thermique des feuilletts.

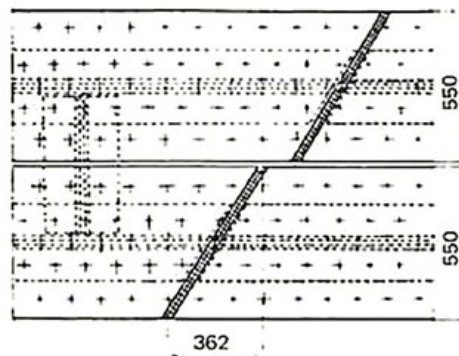


Fig. 117 : Soudure oblique sur fer puddlé (ex : pont d'Oissel) - (bibliographie [4]).

Le choix des électrodes doit être réalisé de façon à donner une ductilité élevée du joint soudé. On utilise des électrodes de référence normalisée ; par exemple, le type E 43 est adapté, les caractéristiques du métal déposé étant supérieures à celles du fer puddlé.

Bien qu'il n'y ait pas de risque de fissuration à froid, dans le cadre de réparation d'ouvrages d'art et du fait des teneurs en impuretés soufre et phosphore élevées, nous retiendrons le choix des électrodes à enrobage basique. Pour éviter les soufflures, les électrodes doivent être étuvées. De plus, le laitier formé, plus froid, contrebalance la fluidité du fer puddlé et facilite ainsi l'exécution des cordons dans certaines positions difficiles.

Les électrodes à enrobage rutile ne semblent pas à proscrire totalement et peuvent être utilisées pour des travaux secondaires. En effet, le dynamisme de l'arc, supérieur à celui d'une électrode à enrobage basique, intéresse un plus grand nombre de feuilletts de fer puddlé.

Les épaisseurs à souder sont généralement faibles (de l'ordre de 6 à 10 mm), le diamètre d'électrode le plus courant est donc le 3,15 mm ; dans certains cas on utilisera le 2,5 ou 4 mm.

Les dessins des assemblages seront établis de façon à intéresser la plus grande étendue possible des fibres du métal et doivent permettre la réalisation de joints à faible bridage. Les joints qui sollicitent le métal selon le sens perpendiculaire au laminage sont proscrits.

Par suite de l'hétérogénéité des fournitures, il convient de procéder à une épreuve de convenance sur un ou plusieurs échantillons représentatifs du métal de la structure.

> Nous retiendrons les dispositions déjà employées qui ont donné totale satisfaction dans les conditions de chantier :

- Soudures bout à bout : réalisation d'un beurrage, puis soudure en quatre passes avec reprise à l'envers sur chanfrein en V à 70°, le beurrage et la soudure étant réalisés selon la répartition des figures 119 et 120.
- Pour les soudures d'angle il peut y avoir formation de caniveaux, provoquée par la présence d'un dédoubleage à faible profondeur sous la peau (bibliographie [5]). Sous l'effet de la tension superficielle, le métal fondu peut former un sillon latéral le long du cordon de soudure (fig. 108). Pour remédier à cette difficulté deux dispositions constructives peuvent être retenues :

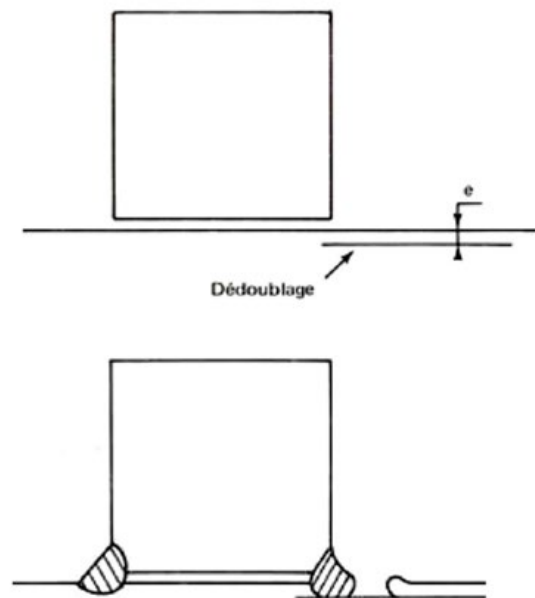


Fig. 118 : Soudures d'angle. Formation de caniveau (bibliographie [4]).

- Réalisation d'une saignée étroite à la meule (disque de 3 mm d'épaisseur), puis dépôt dans celle-ci d'un cordon de soudure avec une électrode de petit diamètre (2,5 mm) (fig. 109). La réalisation du sillon permet d'intéresser une épaisseur plus grande de métal, ce qui a pour effet de faire participer au soudage un nombre plus important de feuillet.

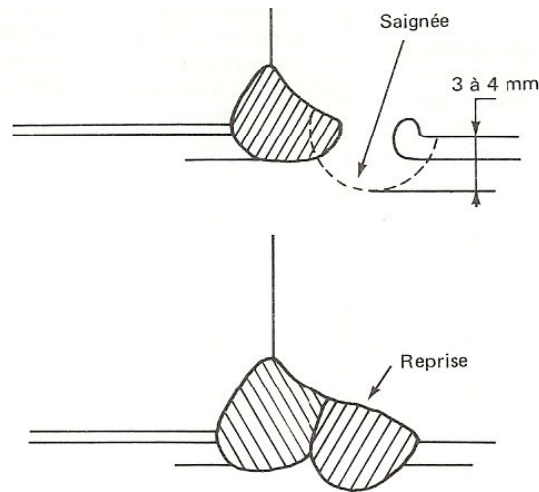


Fig. 119 : Soudure d'angle. Reprise au raccordement (bibliographie [4]).

- Réalisation d'une passe d'accrochage avec beurrage préliminaire comme réalisé dans le cadre du renforcement du pont de Douarnenez. Cette passe d'accrochage permet d'intéresser une plus grande surface de métal.

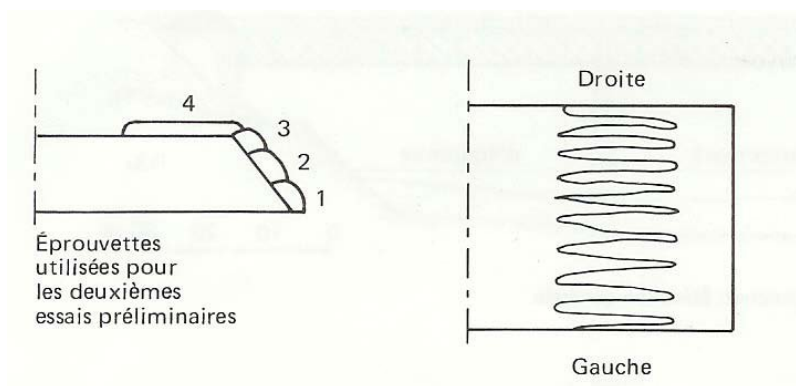


Fig. 120 : Méthode de beurrage du chanfrein (bibliographie [4]).

2.2.7.2 Cas des aciers anciens (extrait de bibliographie [5])

Les aciers anciens destinés à la construction rivée de nuances effervescentes présentent souvent, du fait de leur élaboration, des niveaux de résilience très faibles qui rendent ces aciers incompatibles à une opération de soudage du fait de leur fragilité. La teneur en azote est un point important différenciant les procédés d'élaboration.

Le rôle néfaste des inclusions est signalé aussi bien vis-à-vis de l'amorçage que de la propagation des fissures de fatigue [bibliographie [18]]. De nombreuses observations faites sur pièces ou sur éprouvettes rompues montrent qu'elles peuvent être à l'origine des fissures lorsqu'elles sont de taille suffisante.

> De cette étude (bibliographie [18]), réalisée sur des aciers modernes, nous pouvons retenir les concepts suivants :

- pour un même type de particule et une même taille, l'effet nocif sera plus sensible dans un acier dur que dans un acier doux ;
- il convient de distinguer la localisation des inclusions (influence sur l'amorçage) et la distance inter-inclusionnaire (influence sur la propagation) ;
- bien que le paramètre «forme» ne puisse pas être dissocié de la nature de l'inclusion, il semble jouer un rôle évident ; les inclusions dures et plus ou moins anguleuses sont généralement à l'origine d'un amorçage. En effet, une fissure s'amorce plus vite sur les inclusions anguleuses car elles ont un effet de concentration de contrainte plus important ; au stade de l'amorçage, la longueur de fissure est proportionnelle à la dimension de la zone plastifiée (fig. 111) ;

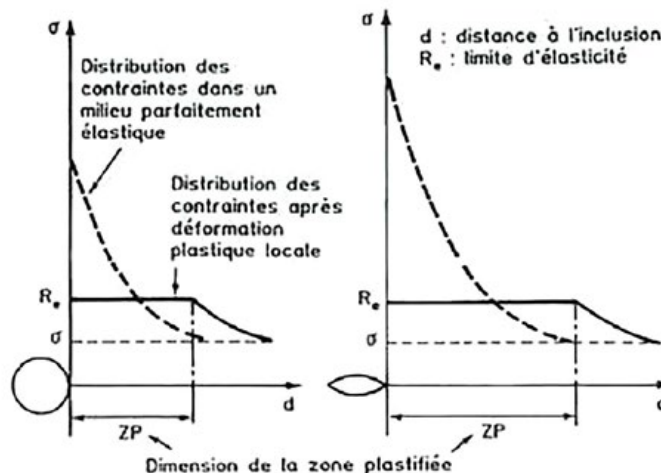


Fig. 121 : Distribution de contrainte autour de particules sphériques ou anguleuses (bibliographie [5]).

- lors d'une opération de soudage, les différences de coefficient de dilatation entre matrice et inclusion entraînent des contractions différentes au refroidissement en créant des contraintes locales. Des mesures de coefficient de dilatation permettent de donner un classement des inclusions par ordre de nocivité. Les inclusions d'oxydes seraient peu nocives. Les inclusions de type alumine, aluminat et silicate créent au refroidissement des contraintes de traction dans la matrice. Les sulfures de manganèse peuvent créer des vides à l'interface ou des décollements.

La soudabilité métallurgique est principalement caractérisée par l'aptitude du métal vis-à-vis du phénomène de fissuration à froid. L'essai de fissuration sur implants (NF EN ISO 17642-3), universellement reconnu, permet de simuler les principales causes du phénomène :

- trempe du métal au voisinage de la zone de fusion,
- introduction d'hydrogène dans le cordon de soudure,
- présence de contraintes importantes.

L'application de cet essai aux aciers anciens met en évidence l'influence prépondérante de l'état inclusionnaire de la matrice.

Bien que le nombre d'aciers testés soit réduit, il apparaît que le risque d'amorçage de la fissuration est fortement influencé par la nature et la répartition des inclusions. Les oxydes globulaires sont peu nocifs, les silicates et sulfures du fait de leur forme sont agressifs.

L'analyse d'aciers vis-à-vis d'une réparation par soudure semble à effectuer sur la base d'une caractérisation chimique, associée à une détermination de la propreté inclusionnaire par examen métallographique et, particulièrement pour les aciers anciens, la réalisation d'une empreinte « BAUMAN » pour vérifier la répartition des inclusions dans la section.

Selon la bibliographie et les résultats des essais de fissuration sur implants (NF EN ISO 17642-3), il est possible de retenir les seuils suivants pour satisfaire au soudage à l'électrode basique dans le cadre de réparation :

> **Composition chimique :**

- C < 0,14 %
- P < 0,05 %
- S < 0,05 %
- N < 0,012 %
- Mn/S > 8

> **État inclusionnaire :**

- oxydes globulaires : peu nocifs,
- silicates, sulfures : nocifs au-delà d'un indice moyen de 1 selon la norme NF A 04-106.

Les nuances effervescentes devront faire l'objet d'une attention particulière vis-à-vis des conditions de fragilité.

Ces seuils ne doivent pas être retenus comme une impossibilité d'utilisation du soudage, mais comme une zone à risque vis-à-vis du phénomène d'amorçage et de propagation de fissures. En conséquence, il conviendra d'examiner la conception des assemblages de façon à obtenir des joints peu bridés, faiblement sollicités en fatigue et non soumis à des efforts de traction selon l'épaisseur des pièces ; de plus, des procédés à énergie élevée seront employés.

2.2.7.3 Cas des aciers modernes

Les aciers élaborés par les procédés à l'oxygène et au moyen de la coulée continue, soit à partir des années 1975 environ, ne présentent généralement plus de problèmes de santé interne (état inclusionnaire, paille, dédoubleures...) et les critères modernes de soudabilité par la notion du carbone équivalent sont applicables.

> **Les formules de Carbone Equivalent employées sont :**

- pour les aciers au Carbone – Manganèse :

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6}$$

- pour les aciers à dispersoïdes :

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Une valeur de 0,40 à 0,42 est limite et correspond à une nécessité de préchauffage.

2.2.7.4 Cas particuliers : aciers autopatinables

Les aciers à teneur élevée en phosphore sont normalement exclus en ouvrages d'art. Sur un ouvrage ancien, il convient de vérifier avant travaux la nuance employée.

Les aciers patinables (hors WA puis XP) peuvent être soudés par les procédés habituels, aussi bien entre eux qu'avec des aciers non alliés aptes au soudage. Si une pellicule protectrice est déjà formée, elle doit être enlevée (par exemple meulage), pour éviter la formation de fissures à chaud sur la surface par des alliages cuivre - fer à bas point de fusion. Si l'acier patinable est laissé sans revêtement, les matériaux d'apport de soudage doivent également résister aux intempéries.

Les fils fins utilisés pour les aciers de construction de même grade peuvent être utilisés pour l'acier Indaten 355. L'apport de cuivre par le cuivrage des fils contribue à la patinabilité des soudures. Les fils fourrés à utiliser sont également du même type que ceux des aciers au carbone - manganèse correspondants.

2.3.1 GÉNÉRALITÉS

La construction des ponts à poutres en treillis au XIX^{ème} siècle et début du XX^{ème}, avant le développement de la soudure, a fait appel au mode d'assemblage par rivetage et par boulonnage ordinaire. En France, il subsiste peu d'ouvrages présentant ce type d'assemblage par boulons ordinaires, en revanche de nombreux sont encore en exploitation dans les pays constituant les anciennes colonies des pays européens. Ainsi on rencontre de nombreux ouvrages de type « Pont Pigeaud », par exemple, constitués d'éléments de 2.5 m montés à l'avancement et assemblés par boulons ordinaires.



Fig. 122 : Pont Pigeaud - assemblages par boulons ordinaires (photo Jean-Paul PERSY).

(extrait de bibliographie [6])

Des boulons à haute résistance ont été utilisés en France dès les années 1950 pour la réparation et le renforcement de ponts-rails rivés. Leur utilisation s'est étendue ensuite aux ouvrages neufs dans les années 1960. Sur certains ouvrages, tous les assemblages étaient des assemblages boulonnés ; sur d'autres, les assemblages en atelier étaient soudés, ceux sur chantiers boulonnés. Quand le soudage s'est généralisé en atelier et sur chantier, l'usage des boulons a été restreint aux assemblages difficiles, par exemple ceux des ponts à poutres triangulées. Puis, ces ponts eux-mêmes ont pu être entièrement soudés, ce qui a diminué encore le champ d'utilisation des boulons.



Fig. 123 : Pont Warren sur le Rhin - Construction soudée - assemblages boulons HR (~1965) - (photo Jean-Paul PERSY).

Dans le cas de grands ouvrages, le boulonnage convient mal à l'assemblage des pièces épaisses et fortement sollicitées : il nécessite un nombre élevé de boulons et n'assure qu'un placage imparfait. Les assemblages boulonnés, quand ils sont utilisés, servent donc surtout à assembler sur chantier les entretoises ou les pièces de pont aux poutres principales. Le boulonnage est aussi utilisé pour assembler aux tabliers des éléments secondaires (rails de passerelles de visite) et des éléments provisoires (avant-becs de lancement, entretoisements de montage).

Pour certains petits ouvrages, le boulonnage peut permettre d'éviter tout assemblage soudé.

Dans le cadre de réparation d'ouvrages in situ, la technique du boulonnage est utilisée sur ouvrages anciens en remplacement du rivet ou en cas de difficultés de soudage métallurgique et / ou opératoire.

Dans ce qui suit, on désigne par boulon l'ensemble de l'élément de fixation composé d'une vis à tête hexagonale, d'un écrou hexagonal et de rondelles.

2.3.2 CATÉGORIES D'ASSEMBLAGES BOULONNÉS (EXTRAIT DE BIBLIOGRAPHIE [6])

> Les assemblages boulonnés se caractérisent :

- par le mode de sollicitation
 - efforts perpendiculaires à l'axe des boulons
 - efforts parallèles à l'axe des boulons
- par le mode de fonctionnement
 - non précontraint
 - précontraint

2.2.2.1 Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de sollicitation

Assemblages sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons

C'est le cas des assemblages de continuité des poutres. Les efforts sollicitant les éléments assemblés peuvent être principalement des efforts normaux (assemblage des membrures) ou des efforts de cisaillement (assemblages des âmes). La continuité des pièces est assurée par des couvre-joints (figure 124).

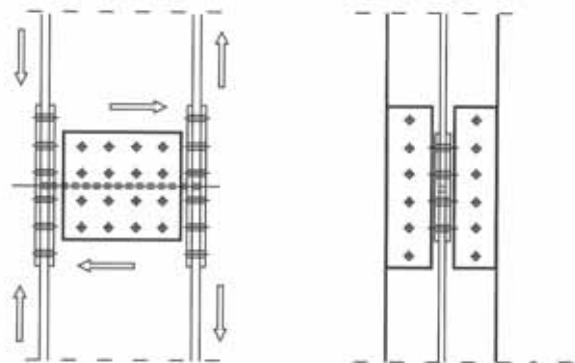


Fig. 124 : Assemblages boulonnés sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons (bibliographie [6]) - (SETRA).

Assemblages sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons

C'est le cas des assemblages poutre-poteau de bâtiment avec platine d'about. Généralement, il s'exerce à la fois un moment fléchissant et un effort tranchant et on a une combinaison d'efforts parallèles et d'efforts perpendiculaires à l'axe des boulons (figure 125).

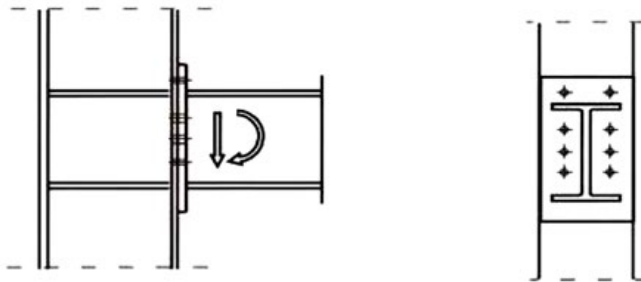


Figure 125 : Assemblage boulonné sollicité parallèlement à l'axe des ponts (déconseillé pour les ponts) (SETRA) - (bibliographie [6]).

2.3.2.2 Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de fonctionnement (extrait bibliographie [6])

Assemblages non précontraints

Les boulons de ces assemblages sont mis en œuvre avec un serrage peu important et non spécifié de façon précise.

Sous des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons, les pièces assemblées glissent l'une par rapport à l'autre pour rattraper le jeu entre le trou et la vis ; les efforts appliqués sont alors transmis par la pression diamétrale que les vis exercent sur les pièces assemblées et par le cisaillement de ces vis (tableau XVIII, catégorie A).

Sous des efforts parallèles à l'axe des boulons, les efforts de traction appliqués sont transmis directement par traction des vis (tableau XVIII, catégorie D).

Assemblages précontraints

Les boulons de ces assemblages sont mis en œuvre avec un serrage contrôlé, de façon à ce qu'une pression importante et définie agisse sur les surfaces en contact des pièces.

Dans le cas d'efforts appliqués perpendiculairement à l'axe des boulons, ces efforts sont transmis d'une pièce à l'autre par le frottement que la force de précontrainte permet de développer entre les surfaces en contact, sans qu'il y ait glissement des pièces ni cisaillement des vis (figure 126). Ainsi, ces assemblages fonctionnent sans déformation importante et résistent aux variations répétées de sollicitations.

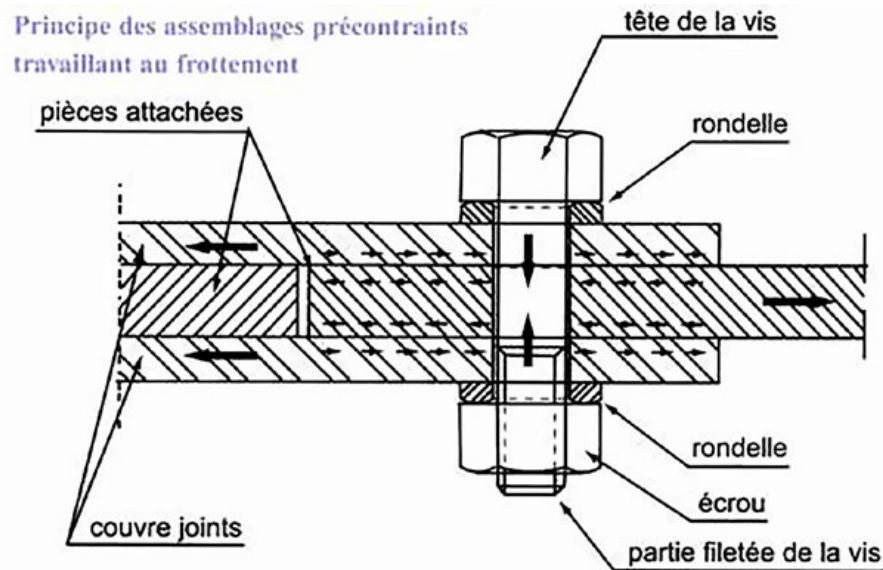


Fig. 126 : Principe des assemblages précontraints travaillant au frottement (bibliographie [6]) - (SETRA).

L'eurocode 3 subdivise ce type d'assemblage en deux catégories, B et C (tableau XVIII). L'assemblage de catégorie B a un mode de fonctionnement intermédiaire : le glissement des pièces est exclu jusqu'à l'état-limite de service, mais il est admis au-delà ; ainsi, à l'état-limite ultime, le mode de fonctionnement est proche de celui d'un assemblage non précontraint. Au contraire, l'assemblage de catégorie C fonctionne sans aucun glissement des pièces jusqu'à l'état-limite ultime (qui ne correspond donc plus, dans ce cas, à un critère de ruine effective de l'assemblage) et les boulons ne sont jamais sollicités par les charges.

L'assemblage de catégorie B n'est pas pratiqué en France : les assemblages précontraints sont toujours de catégorie C.

Dans le cas d'efforts appliqués parallèlement à l'axe des boulons, la force de précontrainte est déterminée pour qu'il n'y ait pas décollement des pièces assemblées sous les efforts de traction maximaux appliqués. Ainsi, les efforts extérieurs appliqués sont équilibrés essentiellement par la décompression des pièces et très peu par une surtension des boulons. Ce mode de fonctionnement correspond au segment de droite AB, de pente très faible, de la figure 127.

Au-delà du point B, il y a décollement des pièces et tout accroissement de l'effort de traction appliqué s'ajoute intégralement à la tension de précontrainte du boulon, ce qui entraîne rapidement sa ruine.

D'après ce modèle, les boulons tendus travaillant dans le domaine AB pourraient résister sans dommage à des sollicitations de fatigue.

En réalité, le comportement de ces assemblages est difficile à garantir. Il est influencé en particulier par les défauts de contact des platines et par les déformations des platines en flexion sous l'action des charges. Ces facteurs peuvent amener de la fatigue, des pertes de précontrainte et de la corrosion. Des conditions idéales, platines d'about parfaitement planes et suffisamment épaisses par rapport aux dimensions des pièces assemblées, permettent d'éviter ces inconvénients, mais sont difficilement réalisables dans le cas des ponts.

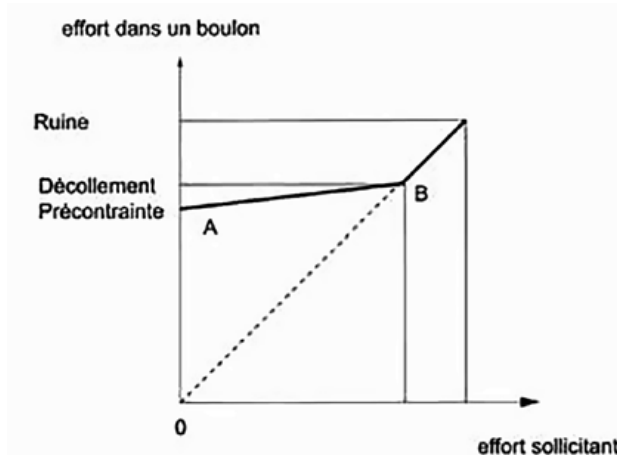


Fig. 127 : Principe de fonctionnement des assemblages précontraints sollicités par des efforts de traction parallèle à l'axe des boulons (bibliographie [6]) - (SETRA).

2.3.2.3 Récapitulation des différentes catégories d'assemblages boulonnés (extrait bibliographie [6])

En combinant les critères de classement ci-dessus, il apparaît (tableau XVIII) cinq catégories d'assemblages boulonnés, que l'eurocode 3 désigne par une lettre de A à E. Ces cinq catégories couvrent les différents cas qu'il est possible de trouver dans les divers domaines de la construction métallique.

	assemblages sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons	assemblages sollicités parallèlement à l'axe des boulons
assemblages non précontraints	A vis sollicitées au cisaillement par les efforts appliqués	D vis sollicitées en traction par les efforts appliqués
assemblages précontraints	B pas de glissement des pièces avant l'état-limite de service : au-delà, fonctionnement comme en catégorie A	E vis sollicitées en traction par la force de précontrainte
	C pas de glissement des pièces avant l'état-limite ultime : vis sollicitées en traction par la force de précontrainte	

tableau XVIII : Catégorie d'assemblages boulonnés (seule la catégorie C est admise pour les éléments structuraux de ponts) (bibliographie [6]) - (SETRA)

2.3.3 ASSEMBLAGES BOULONNÉS À UTILISER POUR LES PONTS (EXTRAIT BIBLIOGRAPHIE [6])

2.3.3.1 Assemblages non précontraints

> **Les assemblages non précontraints (catégories A et D du tableau XVIII) sont fréquemment utilisés en bâtiment. Mais ils ne conviennent pas pour les ponts :**

- les charges variables et les vibrations provoquent le glissement des pièces, entraînant des déformations de profil en long, des redistributions indésirables des efforts et le desserrage des boulons ;
- ces assemblages ne résistent pas à la fatigue ; c'est particulièrement le cas des assemblages non précontraints avec platine d'about (catégorie D du tableau XVIII), dans lesquels les vis sont sollicitées en traction directement par les efforts appliqués ;
- ils sont sensibles à la corrosion, car ils laissent pénétrer l'humidité et les autres agents de corrosion.

> **Le fascicule 66 du CCTG (article II.4) n'admet les assemblages non précontraints que pour les utilisations suivantes :**

- pour assembler entre elles des parties d'éléments accessoires (mais pas pour les fixer à la structure des ouvrages) ;
- pour assembler des éléments provisoires, y compris pour les fixer provisoirement à la structure.

Les éléments accessoires sont des éléments n'ayant aucun rôle dans la résistance ou la stabilité de la structure. Il s'agit, par exemple, des dispositifs de visite fixes ou mobiles, des échelles d'accès, des supports de canalisation. L'interdiction d'assemblages non précontraints entre ces éléments et la structure est liée au risque de corrosion.

Les éléments provisoires sont des éléments participant généralement à la résistance ou à la stabilité de la structure durant la construction, mais qui sont démontés avant la mise en service de l'ouvrage. Ce sont, par exemple, les contreventements et les entretoisements de montage, les avant-becs de lançage, les oreilles de fixation des câbles de montage... Comme ces éléments ne demeurent pas sur la structure en service, l'absence de précontrainte des assemblages est sans grand inconvénient et elle facilite le démontage.

2.3.3.2 Assemblages précontraints sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons (extrait bibliographie [6])

> C'est la seule catégorie d'assemblages boulonnés admise dans les cas autres que ceux mentionnés précédemment. Ils sont donc à utiliser pour les assemblages définitifs :

- des éléments de structure entre eux ;
- des éléments accessoires à la structure.

Comme indiqué précédemment, seule la catégorie C du tableau XVIII (non-glissement à l'état-limite ultime) est admise en France.

2.3.3.3 Assemblages précontraints sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons (extrait bibliographie [6])

Les assemblages précontraints avec platine d'about (catégorie E du tableau XVIII) ont parfois été utilisés pour les ponts, par exemple pour assembler des entretoises à des montants de poutres principales. En France, la réglementation actuelle déconseille cette utilisation, en raison des risques de désordre évoqués.

Ces assemblages sont cependant traités dans le fascicule 61, titre V du CCTG. Cela provient de ce que le titre V était applicable, avant 1977, aussi bien au bâtiment qu'au génie civil. Lorsque ce texte a été retiré de la liste des fascicules applicables au bâtiment, les dispositions qu'il contenait sur les assemblages boulonnés ont été conservées sans modification ; mais la circulaire ministérielle du 18 février 1978, qui figure en tête de la version actuelle du titre V du fascicule 61, a inclus une mise en garde contre l'utilisation de ces assemblages dans les ponts.



Fig. 128 : Assemblage par boulons HR sollicités parallèlement à l'axe des boulons - défaut d'alignement dû au retrait de soudage (photo Jean-Paul PERSY).

2.3.4 HISTORIQUE RÉGLEMENTAIRE ET NORMATIF (EXTRAIT BIBLIOGRAPHIE [3])

2.3.4.1 L'aspect réglementaire : boulons à haute résistance

Importée des États-Unis après la seconde guerre mondiale, la technique d'assemblage par boulons à haute résistance a commencé à être codifiée au début des années 1960. Le fascicule 4 titre IV, relatif aux rivets et boulons à haute résistance, a été publié en septembre 1967.

Les boulons à haute résistance peuvent être de classe 10.9 ou 8.8 (fasc. 66).

Les boulons sont constitués comme un ensemble comportant une vis, un écrou et deux rondelles (excepté pour les vis présentant une tête à embase), le filetage de la vis étant réalisé exclusivement par roulage. Le fascicule décrit des essais sur éprouvette et sur produits finis (dureté, résilience, traction, traction avec rondelle biaise). Il définit en outre un essai d'aptitude au serrage comportant le tracé de la courbe effort-allongement et « la courbe obtenue devra être approximativement rectiligne de l'origine jusqu'à une contrainte au moins égale à celle correspondant à la limite d'élasticité de la vis ».

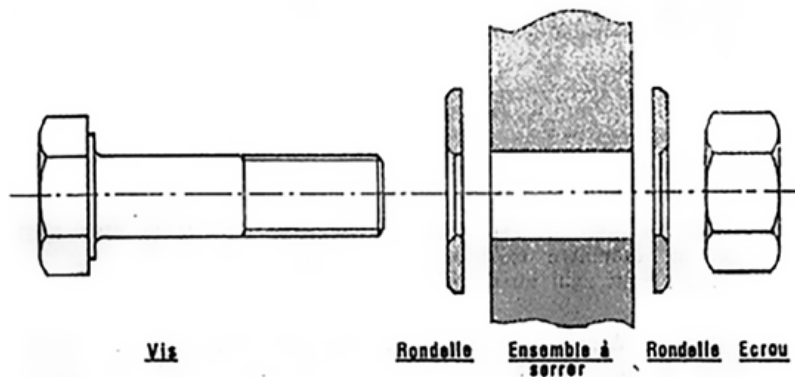


Fig. 129 : Boulon HR de type courant - (Fascicule 4 titre IV).

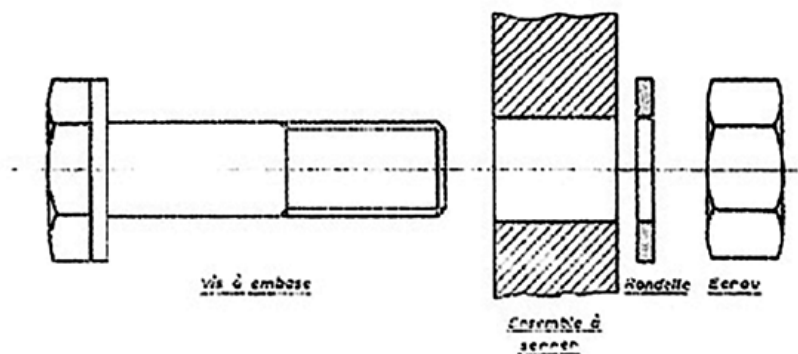


Fig. 130 : Boulon HR à tête à embase - (Fascicule 4 titre IV).

Pour les conditions de réception, la règle est la présentation en recette, avec un effectif d'échantillon spécifique à chaque produit : rond, rivet ou boulon et conformément aux prescriptions du fascicule 4 titre III. Publié un an après ce dernier, le fascicule 4 titre IV reste dans le même esprit en soulignant la spécificité des travaux relevant des services des Ponts et Chaussées.

> **Les caractéristiques chimiques et mécaniques sont définies dans le fascicule 4 titre IV de 1967 :**

Boulons HR 10,9 : composition chimique					
Diamètres (mm)	C	S	P	Cr	Mo
<= 16	0,35 / 0,40	<= 0,035	<= 0,035	0,85 / 1,15	
>= 16	0,38 / 0,43	<= 0,035	<= 0,035	0,85 / 1,15	0,15 / 0,30
selon fascicule spécial 67-17 quater					
Caractéristiques mécaniques					
	traction			Résilience	Dureté
	R hbars	E hbars	A%	KCU -20° daJ/cm ²	HRC
Vis	>= 98,0	>= 88,2	>= 8	>= 4	>= 29
	<= 117,6				
Ecrou	>= 78,4	>= 62,7	>= 12	>= 7	
	<= 98,0				
selon fascicule spécial 67-17 quater					

Tableau XIX – Caractéristiques chimiques et mécaniques des boulons HR (fasc. 4 titre IV).

Le fascicule 4 titre IV, révisé en mars 1983, s'appuie sur un support normatif et instaure la mise en place, pour les boulons à serrage contrôlé, d'un organe d'agrément et de contrôle pour la certification avec création du Comité de la Marque « NF - Boulons à serrage contrôlé ».

Une analyse détaillée de la structure et du contenu du texte a été publiée dans le *Bulletin Ponts Métalliques n° 10* (bibliographie [22]).

2.3.4.2 L'aspect normatif (extrait bibliographie [6] et [22])

La norme européenne **NF EN 1090-2 Exécution des structures en acier et des structures en aluminium – Partie 2 : Exigences techniques pour l'exécution des structures en acier** apporte des modifications aux procédures de mise en œuvre.

2.3.4.2.1 Boulons ordinaires

Les boulons ordinaires (appelés parfois boulons d'usage général, ou encore boulons normaux) sont les boulons aptes à être utilisés seulement pour les assemblages non précontraints.

Leurs caractéristiques mécaniques sont définies dans la norme NF EN 20898 caractéristiques mécaniques des éléments de fixation :

- partie 1 : boulons, vis et goujons.
- partie 2 : écrous avec charges d'épreuve spécifiées.

Cette norme s'applique pour des diamètres de vis jusqu'à 39 mm. Elle définit des classes de qualité, qui sont symbolisées par deux nombres :

- le premier représente 1/100 de la résistance nominale à la traction R_m en N/mm² ;
- le second représente $10 R_p/R_m$ (R_p étant la limite d'élasticité nominale).

Les valeurs effectives sont égales ou supérieures à ces valeurs nominales.

La norme spécifie une résilience minimale des vis pour certaines classes de qualité, mais pour une température d'essai de +20 °C seulement.

Le fascicule 66 du CCTG (article II.4) restreint le choix de la classe à la classe 8.8 au minimum dans le cas d'utilisation pour des éléments provisoires de structure, ce qui laisse le choix, dans ce cas, entre des boulons 8.8 et 10.9 (tableau XX).

Les caractéristiques géométriques des produits sont définies dans des normes spécifiques.

classe	R_m (N/mm ²)	R_p (N/mm ²)
8.8	800	640
10,9	1000	900

Tableau XX : Boulons ordinaires et boulons à haute résistance : résistance à la traction R_m et limite d'élasticité R_p (valeurs nominales) (bibliographie [6]).

2.3.4.2.2 Boulons à haute résistance

Deux mois après l'approbation du fascicule ministériel, fin 1967, paraissait la norme expérimentale NF E 27-701 **Boulonnerie à haute résistance - Spécifications techniques** qui reprenait les mêmes valeurs ; elle était accompagnée de la norme expérimentale NF E 27- 711 relative aux caractéristiques géométriques.

En Janvier 1977 paraissait la norme homologuée NF E 27-701 révisée, sous le titre **Boulonnerie à serrage contrôlé destinée à l'exécution des constructions métalliques - Spécifications techniques**, où les caractéristiques mécaniques comportaient de légères différences par rapport aux précédentes. Par ailleurs, outre la NF E 27-711, révisée également, deux normes, NF E 27-702 et NF E 27-703, précisaient respectivement les modalités de l'essai d'aptitude au serrage et les conditions générales de livraison. Pour remplir toutes ces conditions, les fabricants de boulons ont été amenés à modifier bien des paramètres ; le plus important étant celui d'un changement de nuances d'acier. Mais on peut signaler aussi une recherche de tolérances serrées sur les filetages, un relèvement de la limite d'élasticité vraie (actuellement, les limites d'élasticité pour des boulons de la classe 10.9 sont plus près de 1 000 MPa que de 900 MPa), une augmentation de la hauteur d'écrou (0,9 d au lieu de 0,8 d), etc.

En octobre 1984, était publiée une nouvelle révision de l'ensemble des normes de boulons à serrage contrôlé, ce qui mettait en cohérence le fascicule 4 titre IV et les normes de produits.

Ces normes sont à nouveau révisées lors de la publication des normes européennes NF EN 14399 d'août 2005.

Les boulons à haute résistance (appellation de l'eurocode 3), ou boulons à serrage contrôlé (appellation des normes françaises de 1977 et 1984), sont les boulons aptes à être utilisés pour les assemblages précontraints. Ils sont conçus pour être serrés avec une force de précontrainte élevée. Ils ne doivent pas périr par arrachement du filetage, ce qui donnerait une perte brutale de résistance en traction, mais par allongement plastique du corps de la vis.

Bien entendu, il est possible d'utiliser des boulons à haute résistance à la place de boulons ordinaires dans des assemblages non précontraints.

> Lors de la publication du fascicule 4 titre IV en mars 1983, les normes françaises concernant les boulons à serrage contrôlé publiées en 1977, puis révisées à l'occasion de la rédaction du fascicule 4 titre IV du CCTG sont (elles sont applicables pour des vis de diamètre jusqu'à 30mm) :

- NF E 27-701 *Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques - Spécifications techniques - Conditions de commande, de contrôle et de livraison,*
- NF E 27-702 *Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques - Essai d'aptitude à l'emploi des boulons,*
- NF E 27-711 *Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques - Boulons à tête hexagonale - Dimensions et tolérances.*

> Et plus récemment (avril 2004) :

- NF E 25- 812 *Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte Système HRC : Boulons à précontrainte calibrée.*

Chacune de ces normes traite l'ensemble du boulon, c'est-à-dire la vis, l'écrou et la rondelle, et non chaque élément séparément comme c'est le cas pour les normes sur les boulons ordinaires et pour les différentes parties de la norme européenne NF EN 14399 actuelle.

La norme NF E 27-701 retient les deux classes de qualité 8.8 et 10.9 (tableau XX).

La classe 10.9 est seule admise par le fascicule 66 du CCTG (article II.4.2), afin de minimiser le nombre de boulons par assemblage.

> L'essai, dit d'aptitude à l'emploi, est destiné à préciser le comportement mécanique de l'ensemble vis-écrou-rondelles au cours du serrage. Cet essai, dont les modalités sont définies dans la norme NF E 27-702 puis NF EN 14399-2, consiste à déterminer :

- la courbe traction-allongement du boulon complet, afin de vérifier qu'il peut supporter la charge de précontrainte prévue sans dépasser sa limite d'élasticité ;
- la courbe traction-couple de serrage, qui donne la valeur du coefficient de rendement du couple de serrage ; ce coefficient est utilisé pour régler la force de serrage de l'outil de pose.

La liste des essais à effectuer par le producteur est fixée dans le règlement de la certification NF Boulons à serrage contrôlé. Dans le cadre de l'application du CCTG, seuls des boulons -système HR certifiés «NF - Boulons à serrage contrôlé» (ou couverts par une certification reconnue équivalente) peuvent être utilisés pour les assemblages précontraints (fascicule 4, titre IV, du CCTG).

> La normalisation européenne publiée en août 2005 est constituée, à ce jour de 6 parties de la norme NF EN 14399. Les systèmes HR, et HV coexistent :

- NF EN 14399-1 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte.* Partie 1 : *Exigences générales*
- NF EN 14399-2 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte.* Partie 2 : *Essais d'aptitude à l'emploi pour la mise en précontrainte.*
- NF EN 14399-3 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte.* Partie 3 : *Système HR – Boulons à tête hexagonale (vis + écrou)*
- NF EN 14399-4 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte.* Partie 4 : *Système HV – Boulons à tête hexagonale (vis + écrou)*

- NF EN 14399-5 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte. Partie 5 : Rondelles plates*
- NF EN 14399-6 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte. Partie 6 : Rondelles plates chanfreinées*

> **Le point fondamental de cette norme consiste à considérer l'ensemble vis-écrou-rondelle, non pas comme un assemblage de constituants séparés, mais comme un tout et d'en vérifier les performances par un essai d'aptitude au serrage. Il y est défini trois classes relatives au coefficient k de rendement du couple (bibliographie [23]) :**

- k_0 : aucune exigence
- k_1 : le coefficient k doit être compris entre deux valeurs limites
- k_2 : le coefficient k moyen du lot, ainsi que son coefficient de variation doivent être déterminés

L'attention est attirée sur le fait que la mise en œuvre des boulons précontraints par la méthode du couple exige une bonne connaissance du coefficient k et de sa dispersion. Le recours à la classe k2 est donc obligatoire.

La norme NF EN 14399 sera complétée par des parties supplémentaires en cours de préparation :

- partie 7 : Système HR – *Boulons à tête fraisée*
- partie 8 : Système HV – *Boulons ajustés à tête hexagonale*
- partie 9 : Système HR ou HV – *Boulons avec rondelles indicatrices de précontrainte*

Les boulons sont disponibles en deux états de livraison : sans revêtement (boulons dits « noirs »), et galvanisé à chaud. Dans ce dernier cas, le décapage avant galvanisation est effectué maintenant par voie mécanique (grenailage) ; la voie chimique, avec décapage dans un bain acide, est interdite dans le règlement de la certification NF, parce qu'elle entraîne un risque de fragilisation par l'hydrogène.

Les produits sont fournis lubrifiés. Les vis, écrous et rondelles sont livrés dans des boîtes assurant la protection contre la poussière, l'humidité et les chocs. Les trois composants sont livrés ensemble dans une même boîte. L'étiquetage de la boîte doit indiquer les caractéristiques des produits, parmi lesquelles le coefficient de rendement du couple de serrage.

Le numéro du lot de fabrication doit aussi être indiqué sur l'étiquetage. Ce lot doit être homogène, c'est-à-dire qu'il doit être composé de vis d'un même lot de fabrication, d'écrous d'un même lot de fabrication et de rondelles d'un même lot de fabrication. Le changement de lot d'un des composants doit entraîner un nouveau numéro de lot de boulons. À partir du numéro de lot, le fabricant de boulons doit être en mesure d'assurer la traçabilité des composants, c'est-à-dire de retrouver leurs caractéristiques et les résultats des contrôles.

2.3.4.3 Indications normalisées et marquage NF des boulons

> **Les boulons ordinaires doivent porter les indications suivantes :**

- sur la tête des vis : la classe de qualité de la vis et le symbole d'identification du fabricant ;
- sur les écrous : la classe de qualité de l'écrou (définie par le premier nombre seulement) ;

Sur les rondelles, aucune indication n'est exigée.

En outre, pour les produits certifiés NF, les lettres «NF» doivent figurer sur les vis et les écrous.

> **Pour les boulons à haute résistance, de la marque NF, les indications doivent être les suivantes :**

- sur la tête des vis : les lettres «HR», la classe de qualité de la vis, le symbole d'identification du fabricant, les lettres «NF» et, plus récemment, le numéro du lot de boulons ;
- sur les écrous : les lettres «HR», la classe de qualité de l'écrou (définie par le premier nombre seulement) et le symbole d'identification du fabricant ;
- sur les rondelles : les lettres «HR» et le symbole d'identification du fabricant.



Fig. 131 : Exemple de marquage sur la tête de vis (document UTN).

Ces dispositions sont celles de la norme NF E 27-701 reprises dans le règlement de la marque et dans la norme NF EN 14399-1.

2.3.4.4 Production étrangère - Boulons HV.

Il faut noter qu'il existe en Europe des boulons portant l'indication «HV» (initiales de «haute résistance» en allemand). Ces boulons font l'objet de la norme européenne NF EN 14399-4. D'un coût plus bas que les boulons «HR», ils correspondent à des spécifications moins sévères que celles du système HR. Ils ne supportent pas la même précontrainte ; en outre, leur mode de rupture est souvent par arrachement du filetage et non, comme il est souhaitable, par rupture ductile du corps de la vis.

> **Les boulons HV se distinguent des boulons HR principalement par la hauteur de l'écrou :**

- $m \sim 0.8 d$ pour le système HV
- $m \sim 0.9 d$ pour le système HR

Ce qui génère le mode de rupture de chaque système de boulons.

2.3.5 CALCUL DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

2.3.5.1 Calcul des assemblages non précontraints

Il peut être utilisé des boulons HR pour constituer des assemblages non précontraints (cas A et D du tableau XVIII). Dans ces cas le traitement des surfaces est sans importance.

Antérieurement, le calcul des assemblages non précontraints était traité dans la norme NF P 22-430 : Assemblages par boulons non précontraints - dispositions constructives et calculs des boulons. Ces éléments sont repris au niveau de l'eurocode 3.

Pour les assemblages sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons, les vérifications portent sur la résistance au cisaillement des vis et sur la résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées.

Pour les assemblages sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons, les vérifications portent sur la résistance des vis à la traction.

2.3.5.2 Calcul des assemblages précontraints

Antérieurement, le calcul des assemblages non précontraints était traité dans la norme NF P 22-460 : Assemblages par boulons à serrage contrôlé - dispositions constructives et vérification des assemblages.

La vérification de base des assemblages sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons porte sur l'absence de glissement des pièces à l'état-limite ultime. Il faut aussi vérifier, à titre de sécurité complémentaire, la résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées.

La norme base les calculs sur la limite d'élasticité nominale R_p (alors que l'eurocode 3 se réfère à la résistance à la traction). L'effort admissible par boulon et par plan de glissement est Q_{adm} (NF P 22-460 classe 2) :

$$Q_{adm} = \mu_1 P_v$$

$$\text{Avec } P_v = 0,80 A_s R_p$$

μ_1 : coefficient de frottement des surfaces en contact (μ dans NF EN1090-2)

A_s : aire de la section résistante de la vis

R_p : limite d'élasticité nominale de l'acier de la vis, égale à 900 N/mm² pour la classe 10.9.

La même règle figure dans l'article 29 du fascicule 61, titre V, du CCTG. Ces conditions sont reprises dans EN 1993 pour l'eurocode 3.

> Le choix du coefficient de frottement μ_1 dépend de l'état des surfaces en contact. Il existe plusieurs types d'états de surface :

a - Surfaces décapées par projection d'abrasif et conservées indemnes de corrosion jusqu'au boulonnage.

Le décapage peut être effectué juste avant le boulonnage ou il peut être effectué à l'avance en atelier, les surfaces étant ensuite protégées de la corrosion jusqu'au boulonnage. Cette protection provisoire, qui doit être complètement éliminée avant le boulonnage, peut être, par exemple, une pellicule de plastique auto-adhésive, un vernis «pelable», ou une couche légère de peinture décapée au dernier moment. S'il s'est formé un début d'oxydation («fleur de rouille»), elle doit être éliminée par brossage à la brosse métallique.

Dans ce cas, il est possible d'adopter dans les calculs le coefficient de frottement standard $\mu_1 = 0,45$ indiqué dans le fascicule 61, titre V, du CCTG, sans qu'il soit indispensable de procéder à des mesures du coefficient de frottement.

b - Autres états de surfaces.

Il peut s'agir de surfaces peintes ou métallisées, ou, au contraire, de surfaces non protégées et corrodées, avec présence éventuelle de calamine.

Le coefficient de frottement est alors difficile à prévoir et un simple brossage ne permet pas d'obtenir un état de surface défini. Il est préférable de mesurer le coefficient de frottement par des essais sur éprouvette. La méthode de détermination, telle qu'indiquée dans la norme NF P 22-461, devra être définie très en amont lors de la passation du marché.

Dans le cas de réparation in situ, avec reprise d'effort d'une pièce non démontée, le décapage à l'abrasif, très contraignant, devra permettre d'obtenir les surfaces adaptées.

> La norme NF EN 1090-2 : 2011.10 art.8.4 - Préparation des surfaces de contact dans les assemblages résistant au glissement propose des valeurs de coefficient de frottement en fonction de diverses préparations :

Les préparations de surface pouvant être envisagées pour conférer la classe de surface de frottement spécifiée sont indiquées dans le tableau XXI. La classe de surface de frottement obtenue par d'autres traitements ou revêtements doit être déterminée à l'aide de la procédure indiquée dans l'Annexe G (**Essai pour déterminer du coefficient de frottement**).

Traitement de surface	Classe	Coefficient de frottement μ
Surfaces grenillées ou sablées, débarrassées de toute rouille non adhérente, exemptes de piqûres ;	A	0,50
Surfaces grenillées ou sablées : - métallisées par projection d'un produit à base d'aluminium ou de zinc ; - avec une peinture au zinc silicate inorganique d'une épaisseur de 50 μm à 80 μm .	B	0,40
Surfaces nettoyées à la brosse métallique ou au chalumeau, débarrassées de toute rouille non adhérente.	C	0,30
Surfaces brutes de laminage.	D	0,20

Tableau XXI - Classifications pouvant être envisagées pour les surfaces de frottement (NF EN 1090-2 - 8-4).

2.3.6 EXÉCUTION DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

> Le fascicule 66 art. III.4 spécifie :

- « Les assemblages par boulons d'usage général doivent être exécutés conformément aux dispositions de la norme NF P 22-431 *Construction métallique - assemblages par boulons non précontraints - exécution des assemblages* (ou équivalente), en appliquant la classe la plus sévère de cette norme » (soit la classe 2 de la norme).
- « Les assemblages par boulons à serrage contrôlé doivent être préparés conformément aux dispositions de la norme NF P 22-462 *Construction métallique - assemblages par boulons à serrage contrôlé - usinage et préparation des assemblages* (ou équivalente), en appliquant la classe la plus sévère de cette norme » (soit la classe 2 de la norme).
- « L'exécution des assemblages et le contrôle du serrage des boulons doivent être conduits conformément aux dispositions des normes NF P 22-463 *Construction métallique - assemblages par boulons à serrage contrôlé - exécution des assemblages* » (qui renvoie à la norme NF P 22-464 *Construction métallique - assemblages par boulons à serrage contrôlé - programme de pose des boulons*) et NF P 22-466 *Construction métallique - assemblages par boulons à serrage contrôlé - méthodes de serrage et de contrôle des boulons* (ou équivalentes).

2.3.6.1 Exécution des assemblages non précontraints

> La mise en œuvre de ces assemblages est traitée dans les normes :

- Eurocode 3 (antérieurement NF P 22-430) : *Dispositions constructives et calculs des boulons*
- NF P 22-431 : *Exécution des assemblages*. Les éléments sont repris et adaptés dans la norme NF EN 1090-2.

Ces normes ne contiennent aucune exigence particulière sur le serrage des boulons. Il est sous-entendu dans les normes que le serrage est celui pouvant être réalisé avec une clé ordinaire, sans rallonge, ou avec une clé à choc après le premier choc.

Il n'est rien imposé sur le coefficient de frottement des surfaces. Il n'est pas exigé de rondelle, sauf dans des conditions d'emploi particulières précisées dans les normes. Il appartient au Maître d'ouvrage de préciser ces conditions particulières.

Pour l'exécution, deux classes de qualité sont prévues, qui diffèrent par le mode de perçage des trous et par les tolérances géométriques. Le fascicule 66 du CCTG (article III.4.1) prescrit la classe la plus sévère.

2.3.6.2 Exécution des assemblages précontraints

> Les normes concernant la mise en œuvre de ces assemblages sont :

- Eurocode 3 (antérieurement NF P 22-460) : *Dispositions constructives et vérification des assemblages.*
- NF P 22-461 : *Détermination du coefficient conventionnel de frottement*
- NF P 22-462 : *Usinage et préparation des assemblages*
- NF P 22-463 : *Exécution des assemblages*
- NF P 22-464 : *Programme de pose des boulons*
- NF P 22-466 : *Méthodes de serrage et de contrôle des boulons*
- NF P 22-468 : *Serrage par rotation contrôlée de l'écrou - détermination de l'angle de rotation*

Les normes NF P 22-462, NF P 22-463 et NF P 22-466 définissent deux classes. Le fascicule 66 du CCTG (article III.4.2) prescrit la classe la plus sévère, soit la classe 2.

Ces normes sont reprises et adaptées dans le prEN 1090-2.

2.3.6.3 Préparation des assemblages

2.3.6.3.1 Diamètre des trous

La norme NF P 22-462 indique que le diamètre des trous est égal au diamètre nominal d des vis augmenté de :

- 1 mm pour $d < 14$ mm,
- 2 mm pour $d \geq 14$ mm.

La norme NF EN 1090-2 reprend ces valeurs pour les trous ronds normaux en complétant cette prescription à 3 mm pour les diamètres de boulons supérieurs ou égal à 27 mm.

2.3.6.3.2 Usinage des trous

La norme NF P 22-462 indique que les trous de la classe 2 sont percés au diamètre définitif, soit par forage, soit par poinçonnage suivi d'un alésage. Les trous poinçonnés doivent avoir, du côté de la débouchure, un diamètre inférieur de 3 à 4 mm au diamètre définitif, selon que l'épaisseur du produit poinçonné est inférieure ou supérieure à 10 mm.

La norme NF EN 1090-2 art 6.6.3 interdit le poinçonnage sans alésage pour les classes d'exécution EXC3 et EXC4. Des conditions complémentaires portent sur le matériel, l'angle de dépouille et les déformations liées au poinçonnage.

2.3.6.3.3 Tolérances de perçage

La norme NF P 22-462 art. 3-3 précise les tolérances de perçage de co-axialité des trous, d'espacement et d'alignement des trous. Il convient de prendre les prescriptions de la classe 2.

La norme NF EN 1090-2 art 6.6.2 précise les tolérances sur les diamètres des trous et indique, pour les classes d'exécution EXC3 et EXC4, que l'alignement des trous par brochage doit être réalisé de manière à éviter toute distorsion ou élargissement des trous.

2.3.6.3.4 Choix des dimensions des boulons

Diamètres des boulons

Le diamètre des boulons est déterminé par un Bureau d'études en fonction des efforts à transmettre.

Longueur des vis

La longueur des vis doit être déterminée (NF EN 1090-2 art 8.2.2) sur la base des épaisseurs assemblées, la hauteur de l'écrou, l'épaisseur des rondelles et la longueur nominale de dépassement de l'extrémité de la vis. Ce dernier doit être d'au moins 2 pas de filetage pour les boulons non précontraints en traction et pour les boulons précontraints ; d'au moins 3 pas de filetage pour les boulons non précontraints soumis au cisaillement.

Pour les boulons non précontraints, au moins 1 filet complet (outre l'amorce de filetage) doit rester libre entre la surface portante de l'écrou et la partie non filetée de la tige.

Pour les boulons précontraints selon NF EN 14399-3, au moins 4 filets complets (outre l'amorce de filetage) doivent rester libres entre la surface portante de l'écrou et la partie non filetée de la tige.

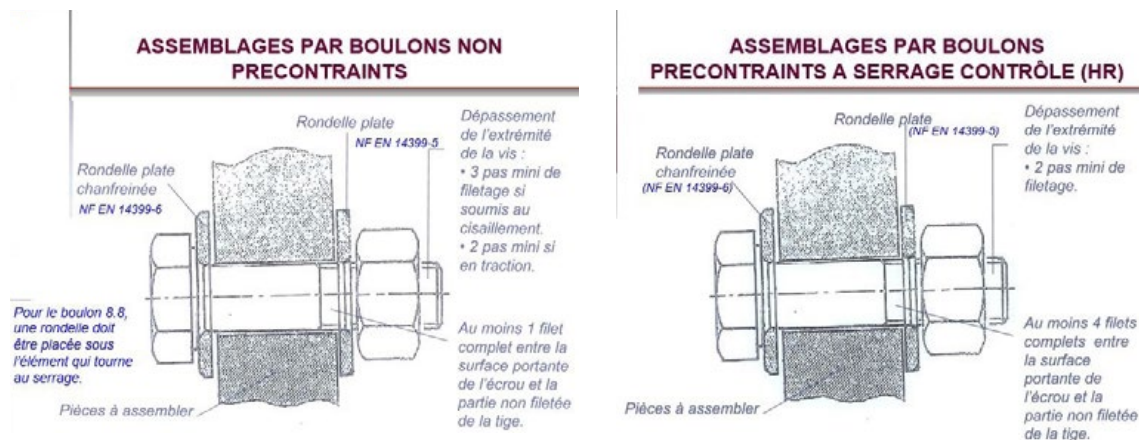


Fig. 132 : Principales conditions de choix dimensionnel des boulons.

Écrous

Il convient que les écrous puissent tourner librement sur leurs vis associées, ce qui est facile à vérifier pendant l'assemblage manuel (NF EN 1090-2 art 8.2.3).

Rondelles

L'utilisation de rondelles n'est pas nécessaire avec des boulons non précontraints utilisés dans des trous ronds normaux.

> Des rondelles plates trempées (ou, si nécessaire, des rondelles biaises trempées) doivent être utilisées pour les boulons précontraints, de la manière suivante :

- pour les boulons 8.8, une rondelle doit être placée sous l'élément qui tourne au serrage, tête de vis ou écrou,
- pour les boulons 10.9, des rondelles doivent être placées à la fois sous la tête de la vis et sous l'écrou.

La rondelle sert à maîtriser les frottements entre la face d'appui de l'écrou et la face en contact de la rondelle.

Les rondelles utilisées sous les têtes de vis précontraintes doivent être chanfreinées conformément à la norme NF EN 14399-6 et positionnées avec le chanfrein orienté vers la tête de la vis. Les rondelles conformes à la norme NF EN 14399-5 ne doivent être utilisées que sous les écrous (NF EN 1090-2 art 8.2.4).

2.3.6.3.5 Espacements des boulons – Pincés

> Les dispositions d'espacement des boulons sont précisées dans les normes :

- NF P 22-430 pour les assemblages non précontraints
- NF P 22-460 pour les assemblages précontraints

Les conditions nécessitent le report aux normes.

Pour les assemblages précontraints, la NF P 22-460 spécifie :

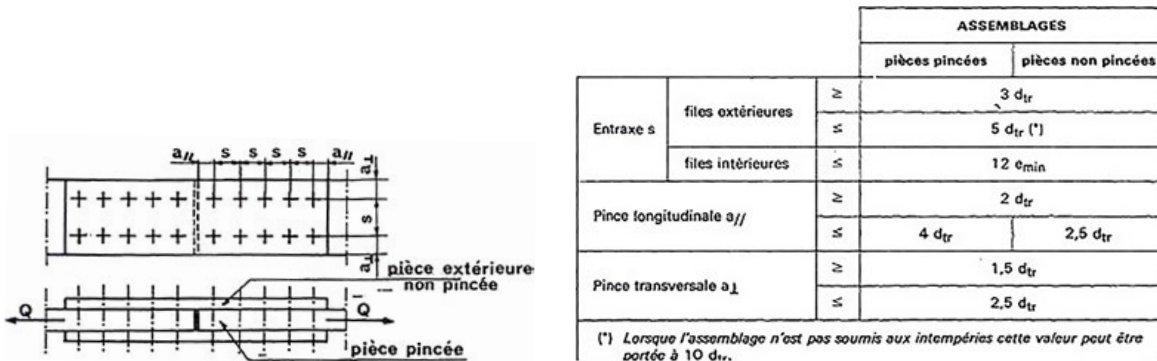


Fig. 133 Entraxe des boulons, pincés longitudinaux, pincés transversaux – classe 2 - NF P 22-460 art. 6.1.2

La norme EN 1993-2 retient une valeur minimale de 2.5 d₀ ; d₀ étant le diamètre des trous. De multiples conditions sont à vérifier.

2.3.6.3.6 Emploi de fourrure

La NF EN 1090-2 art 8.1 indique « Les épaisseurs des divers éléments parties d'un assemblage ne doivent pas différer de plus de 2 mm en règle générale, ou de 1 mm dans les applications précontraintes.

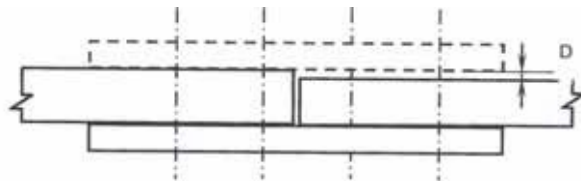


Fig. 134 : Différence d'épaisseur entre éléments d'un même assemblage (NF EN 1090-2).

Lorsque des fourrures métalliques sont prévues pour s'assurer que la différence d'épaisseur n'est pas supérieure à la limite spécifiée ci-dessus, leur épaisseur ne doit pas être inférieure à 2 mm », leur nombre est au maximum de 3...

2.3.6.3.7 Préparation des surfaces de frottement

La norme NF P 22-462 art. 5 précise les conditions des zones d'assemblages : « Les zones d'assemblages devant servir de surface de frottement doivent être préparées pour obtenir au moins le coefficient de frottement pris en compte dans la note de calcul.

Les documents d'atelier doivent indiquer clairement les conditions de préparation des zones d'assemblage.

Si le traitement des surfaces n'est pas effectué suivant des modalités éprouvées ou si les documents du marché imposent leur vérification, les éprouvettes nécessaires à l'application de la norme NF P 22-461 **Construction métallique - Assemblages par boulons à serrage contrôlé - Détermination du coefficient de frottement** doivent être préparées parallèlement et dans les mêmes conditions que les surfaces de frottement des assemblages. »...

Le décalaminage et le dérouillage par meulage sont interdits.

Pour la classe 2, seul le décapage par grenailage ou sablage est autorisé.

> La norme NF P 22-463 art. 6 précise :

- pour les surfaces non protégées en atelier, en classe 2 :

« L'assemblage des pièces doit toujours être précédé d'un séchage au chalumeau si elles sont humides, d'un brossage à la brosse douce en acier destiné à éliminer la fleur de rouille qui aurait pu se former depuis le traitement de surface.

Si celui-ci a été effectué depuis plus de 24 heures, le brossage à la brosse douce sera remplacé par un brossage à la brosse dure ou même par un grenailage ou un sablage si le brossage ne suffit pas à rétablir l'état de surface exigé. »

- Pour les surfaces protégées contre la corrosion – Classes 1 et 2 :

« Si les zones d'assemblage ont reçu un traitement contre la corrosion (prépeints, galvanisation à chaud, métallisation, etc.) elles seront nettoyées et dégraissées. Si ces protections ont été détériorées pendant le transport ou lors de manutentions, elles doivent faire l'objet de réparations avec des produits compatibles avec la protection initiale, qui assurent un coefficient de frottement au moins équivalent à celui prescrit. »

La NF EN 1090-2 art 8.4 - **Préparation des surfaces de contact dans les assemblages résistant au glissement** donne des indications sur les traitements qui sont censés fournir le coefficient de frottement minimal selon la classe de surface de frottement, sans essais (voir tableau XXI).

> Les mesures suivantes doivent être prises en cours de fabrication et de montage afin de s'assurer que la classe de frottement requise est conservée :

a) au moment de l'assemblage, les surfaces de contact doivent être exemptes de toute souillure, par exemple, huile, terre ou peinture ; les bavures susceptibles d'empêcher l'accostage précis des parties assemblées doivent être éliminées ;

b) les traces d'huile doivent être éliminées des surfaces en acier à l'aide de produits de nettoyage chimiques et non au chalumeau ;

c) lorsqu'il est impossible d'assembler des surfaces non revêtues immédiatement après la préparation, elles doivent être protégées par des revêtements résistant aux intempéries. Elles doivent être débarrassées de toute pellicule fine de rouille ou d'autre matériau non adhérent par brossage à la brosse métallique juste avant l'assemblage. Il faut veiller à ne pas endommager ou polir la surface rugueuse. Les zones non traitées autour du périmètre de l'assemblage serré ne doivent pas être traitées avant la fin du contrôle de l'assemblage.

Le cas de la réparation d'ouvrage peut amener la réalisation d'essais d'aptitude avec des pièces représentatives du chantier. Ces essais sont définis en annexe G de la NF EN 1090-2.

2.3.6.3.8 Serrage des boulons HR

Le serrage des boulons est effectué en tournant l'écrou (exceptionnellement la tête) et en maintenant la partie opposée.

Il est évidemment essentiel que le serrage définitif ait une valeur correcte. Un serrage trop faible peut entraîner une insuffisance de la résistance au glissement de l'assemblage. Un serrage trop fort risque d'endommager la vis ou son filetage et d'entraîner une chute de la précontrainte du boulon (c'est un principe, en France, d'éviter toute plastification du boulon au serrage).

> **Deux méthodes sont retenues dans la norme NF P 22-466 :**

- méthode du couple de serrage (couple prédéfini) ;
- méthode du «tour d'écrou» (rotation prédéfinie).

> **La méthode pratiquée pour les ponts est celle du couple de serrage. Elle est effectuée avec une clé dynamométrique étalonnée, réglée pour une valeur de couple donnée par (norme NF P 22-466) :**

$$C = k \cdot d \cdot (k_0 \cdot A_s \cdot R_p)$$

- C : couple de serrage appliqué
- k : coefficient de rendement du couple
- d : diamètre nominal de la vis
- k_0 : coefficient minuteur fixé à 0,88
- A_s : aire de la section résistante de la vis
- R_p : limite d'élasticité nominale de l'acier de la vis, égale à 900 N/mm² pour la classe 10.9 et 640 N/mm² pour la classe 8.8.

La valeur de k, coefficient de rendement du couple, dépend du coefficient de frottement des surfaces en contact. Dans le cas des ponts, il est exclu d'adopter une valeur conventionnelle de k, relevée par exemple dans la littérature technique, en raison de l'incertitude sur le serrage qui en résulterait. C'est pourquoi la valeur de k est déterminée par le fabricant de boulons au cours de l'essai d'aptitude à l'emploi prévu dans le cadre de la certification NF ; cette valeur doit figurer sur l'étiquetage des produits.

La valeur de k est déterminée normalement pour le cas où les boulons sont serrés par rotation de l'écrou. Elle n'est pas valable pour le serrage par rotation de la tête de la vis : le frottement plus élevé conduirait à un important sous-serrage. Lorsque le constructeur est amené à serrer par la tête parce que l'écrou est inaccessible, il doit demander la valeur correspondante de k à son fournisseur.

De faibles valeurs de k facilitent la mise en œuvre : l'effort de serrage est réduit. Les techniques de fabrication et de lubrification actuelles permettent de descendre à 0,10, voire à des valeurs inférieures. Mais des valeurs trop basses aggravent la dispersion du couple de serrage appliqué. Aussi est-il recommandé de respecter la condition $k \geq 0,12$, aussi bien pour les boulons noirs que pour ceux galvanisés.

Le produit $0,88 A_s \cdot R_p$ figurant dans la formule du couple de serrage exprime la valeur initiale de la force de précontrainte de la vis. Le calcul de la résistance au glissement est basé sur une force de précontrainte $0,80 A_s \cdot R_p$: la réduction, dans le rapport 1/1,10, a pour objet de prendre en compte la relaxation de la vis (et le fluage de la peinture quand les surfaces de frottement sont peintes).

La norme NF P 22-463 art. 7 indique, pour la classe 2 :

« Le serrage des groupes de boulons doit s'effectuer suivant le programme de pose. Le nombre de phases de serrage sera tel qu'aucun boulon ne subira de perte de tension due au placage des tôles sous l'effet du serrage postérieur au sien d'un boulon du même groupe.

Seule la méthode de serrage par couple imposé est admise. Celle-ci est décrite dans la norme NF P 22-466 art. 6.1. »

Un préserrage des boulons est utile pour assurer un placage des pièces avant le serrage définitif. Ce préserrage n'est obligatoire que lorsqu'on utilise la méthode de serrage par contrôle de la rotation, ou lorsque le programme de pose le prévoit ; la valeur préconisée pour la force de précontrainte de ce préserrage est de l'ordre de 45 % de la valeur définitive (norme NF P 22-466).

En fait, il est recommandé de pratiquer le préserrage dans tous les cas et de porter sa valeur à 60 % de la valeur définitive. Pour la méthode de serrage par contrôle du couple cette valeur est portée à 75% dans le la NF EN 1090-2 art 8.5.3 ; de plus, pour compenser la diminution ultérieure de la force de précontrainte, la deuxième phase est fixée à 110 % de la valeur de couple M_i requise. D'autres méthodes sont proposées, la révision du fascicule 66 devra préciser ces points.

Pour les groupes comportant de nombreux boulons, le serrage doit être effectué progressivement en partant du centre du groupe vers l'extérieur. Pour obtenir un serrage uniforme jusqu'au refus des boulons, plusieurs cycles de serrage peuvent s'avérer nécessaires.

Les assemblages boulonnés doivent être protégés contre la corrosion par des mesures visant à empêcher l'humidité de pénétrer jusqu'aux surfaces en contact et aux trous des boulons. Cette protection, par exemple un mastic étanche, doit être appliquée dès l'exécution des assemblages. Après le serrage définitif et le contrôle des assemblages, le système de protection contre la corrosion prévu pour l'ouvrage est appliqué sur l'assemblage suivant les conditions définies dans le marché.

L'article 8-5 « serrage des boulons précontraints » de la NF EN 1090-2 apporte des modifications sensibles à la normalisation actuellement en vigueur, qui viendront se substituer aux pratiques actuelles.

2.3.7 CONTRÔLE DU SERRAGE DES BOULONS APRÈS EXÉCUTION DES ASSEMBLAGES PRÉCONTRAINS. (EXTRAIT DE BIBLIOGRAPHIE [6])

2.3.7.1 Généralités

Après la mise en œuvre des boulons, leur serrage doit être contrôlé. L'objectif est de vérifier que la précontrainte est effectivement prise en compte dans le calcul de dimensionnement.

> **Deux méthodes sont définies dans la norme NF P 22-466 :**

- contrôle par desserrage et resserrage de l'écrou ;
- contrôle par surserrage de l'écrou.

La méthode par surserrage est obligatoire pour les boulons qui ont reçu une protection contre la corrosion (galvanisation...) et pour les boulons qui ont été serrés par contrôle de la rotation. Elle présente l'avantage d'être appliquée aux écrous dans leur état de pose définitif. En revanche, elle est mal adaptée à la détection d'un excès de serrage (il en est de même, mais dans une moindre mesure, de la méthode par desserrage - resserrage).

Dans les deux méthodes, il doit être fait usage de clés dynamométriques.

> **Le contrôle doit être effectué :**

- avant que les boulons ne reçoivent leur protection contre la corrosion définitive (peinture ou autre) ;
- dans les 24 heures qui suivent le serrage des boulons si la méthode de contrôle retenue est celle par desserrage - resserrage de l'écrou ;
- immédiatement après le serrage si la méthode de contrôle retenue est celle par surserrage.

Le contrôle doit être confié à des agents expérimentés dans le contrôle des assemblages métalliques boulonnés.

> **L'échantillon de boulons sur lequel porte le contrôle doit répondre aux deux conditions :**

- les boulons sont d'un même lot ;
- la clé de serrage n'a subi aucune modification de réglage pendant une même opération de pose.

2.3.7.2 Contrôle par desserrage et resserrage de l'écrou

La position de l'écrou est repérée sur la pièce assemblée et l'écrou est desserré d'environ 30° (un douzième de tour) en maintenant fermement la tête de la vis. Il est ensuite resserré au couple de contrôle Cc, ou à la précontrainte de contrôle Pc.

Après resserrage de l'écrou, l'écart par rapport à la position initiale doit être dans l'étendue [-25°, + 12°] (pour des boulons de classe 10.9).

2.3.7.3 Contrôle par surserrage de l'écrou

Après avoir repéré la position de l'écrou sur la pièce à assembler, on applique un couple moyen ou une précontrainte moyenne de contrôle, dont la valeur est précisée à l'article 8.5 de la norme NF P 22-466.

L'écart positif par rapport à la position initiale doit être dans l'étendue $[+5^\circ, +12^\circ]$ (pour des boulons de classe 10.9).

2.3.8 LES DIFFÉRENTS TYPES DE BOULONS

Les boulons - système HR, spécifiés par le fascicule 66 et utilisés en France, sont définis par la norme NF EN 14399-3. Ils sont constitués de vis et écrou définis par cette norme et de deux rondelles, l'une plate définie par la norme NF EN 14399-5, placée coté écrou, l'autre plate chanfreinée définie par la norme NF EN 14399-6, placée sous la tête de la vis.

Les boulons - système HV, non utilisés en France, sont maintenant définis par la norme NF EN 14399-4. Ils sont constitués de vis et écrou définis par cette norme et de deux rondelles.

Les boulons HRC sont définis par la norme NF E 25-812 (avril 2004) *Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte -Système HRC - Boulons à précontrainte calibrée*, qui spécifie les exigences relatives aux boulons (vis + écrou + rondelle) destinés à la construction métallique de bâtiments et d'ouvrages d'art, en particulier dans les assemblages résistant au glissement, pour lesquels il est nécessaire d'installer une précontrainte prédéterminée.

Cette norme spécifie les exigences relatives aux éléments constitutifs des ensembles (vis+écrou+rondelle) ainsi qu'aux ensembles (boulons) eux-mêmes.

Le boulon HRC fait partie du système HR et sa particularité réside dans la technique de mise en précontrainte qui est contrôlée par la rupture en torsion de l'embout fusible, précisément calibré, attachant à la vis.



Fig. 135 : Boulon HRC (photo GFD).

Il est conçu de manière à permettre une précontrainte conforme à la norme EN 1993-1-1 (eurocode 3) et à obtenir la ductilité principalement par allongement de la vis.

L'extrémité filetée de la vis est prolongée d'un embout cannelé (bi-hexagonal) muni d'une gorge de rupture. Cette gorge est calibrée de manière à ce que l'embout fusible casse par torsion lorsque le couple de serrage prédéterminé (couple correspondant à la précontrainte exigée) est atteint.

> **Ces boulons sont certifiés NF et disposent des critères de traçabilité de la marque. Tous les boulons doivent être fournis au client dans un emballage, unique et scellé, du fabricant. L'étiquette apposée sur l'emballage doit notamment renseigner :**

- le numéro de lot de fabrication,
- la référence à la norme NF E 25-812,
- le coefficient k moyen et le couple associé.

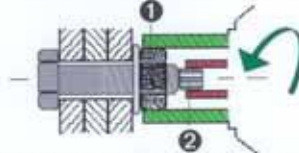
Ce produit fait l'objet du projet de norme européenne EN 14 399-7 en préparation.

Les boulons hexagonaux injectés : l'annexe J de l'EN 1993-2 donne les conditions de résistance de calcul des boulons injectés pour les différentes utilisations de ce produit, soit en catégorie A, B ou C.

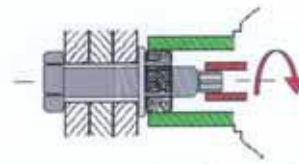
L'annexe K de la norme NF EN 1090-2 fournit des informations supplémentaires sur la fourniture et l'utilisation de boulons hexagonaux injectés.

TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE

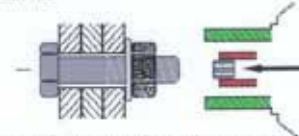
La mise en œuvre du boulon HRC nécessite une visseuse spécifique équipée de deux douilles coaxiales dont l'une s'adapte sur l'écrou et l'autre sur l'embout fusible cannelé.



Au cours de la phase de serrage, la douille en prise sur l'embout fusible maintient la vis en arrêt de rotation, alors que la douille extérieure fait tourner l'écrou dans le sens du vissage.



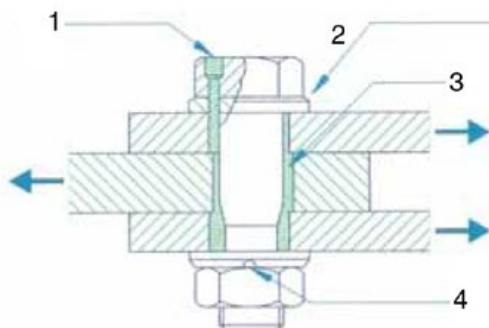
Lorsque le couple pré-déterminé est atteint, la douille extérieure s'arrête de tourner. La douille intérieure tourne alors en sens inverse jusqu'à rupture, par torsion, de l'embout fusible au niveau de la gorge calibrée. La précontrainte visée est alors atteinte.



Après rupture, l'embout fusible est éjecté de la visseuse. L'opération de pose du boulon est achevée.

Fig. 136 : Boulon HRC - technique de mise en œuvre (doc. GFD).

NOTE : Le remplissage de l'interstice entre le boulon et la paroi du trou s'effectue à travers un petit orifice dans la tête du boulon. Après l'injection et la polymérisation complète de la résine, l'assemblage devient résistant au glissement.



- 1: Trou d'injection
- 2: Rondelle chanfreinée
- 3: Résine
- 4: Rainure d'évent dans la rondelle

Fig. 137 : Boulon injecté dans un assemblage à double recouvrement (NF EN 1090-2 annexe K).

Les **rivelons** ou **boulons sertis**, comme les boulons HR transmettent les efforts par frottement (la différence entre boulons HR et rivelons tient au mode de mise en œuvre, le rivelon étant mis en traction à l'aide d'un vérin qui refoule une bague de blocage sur une tige crantée). Ce produit ne fait pas l'objet de norme ni de certification NF.

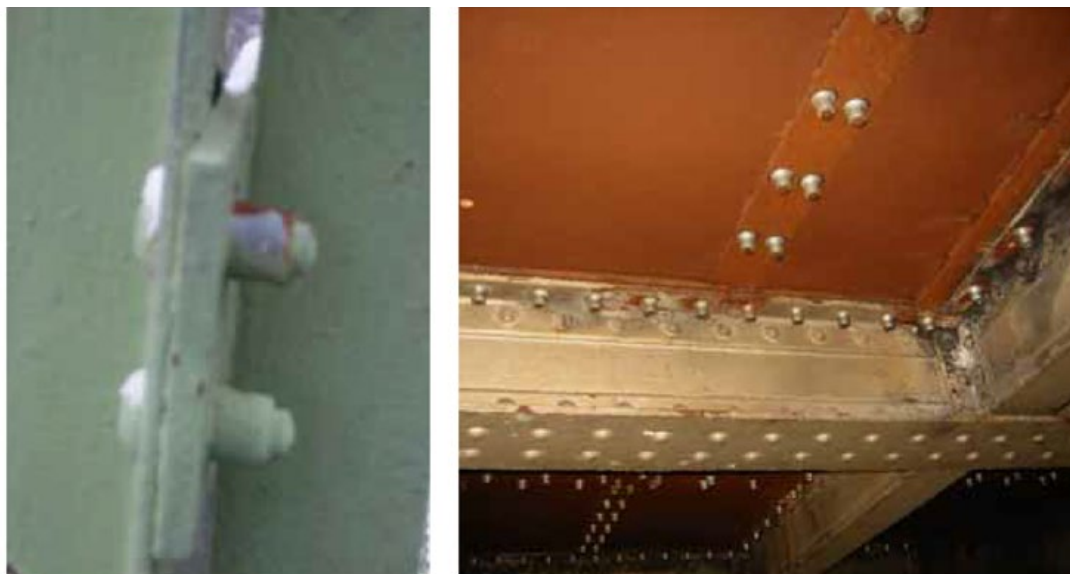
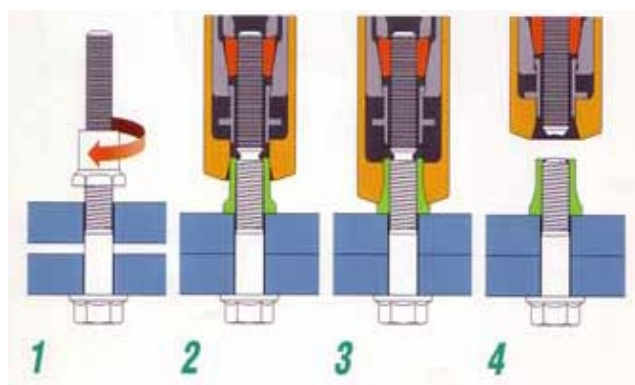


Fig. 138 : Rivelons (photo Jean-Paul PERSY).

Le choix entre le boulon HR, boulon HRC et le rivelon se fait souvent en faveur du boulon pour des raisons économiques (bibliographie [15]) : le rivelon est plus cher en fourniture (en partie à cause des droits de brevet) et il faut que l'entreprise s'équipe du matériel de pose.

> **Sur le plan technique le rivelon présente certains avantages :**



- l'opération de pose se terminant par la rupture d'une tige étalonnée, il ne peut pas être mal « serré » ;
- il ne peut pas se « desserrer » ;
- la cadence de pose est plus rapide que celle des boulons ;
- sur le plan esthétique, la tête du rivelon ressemble à une tête de rivet, ce qui permet d'obtenir une homogénéité d'aspect dans les constructions anciennes ; la bague de sertissage est au contraire inesthétique.

Fig. 139 : Rivelon - mise en œuvre.

2.3.9 RÉPARATION PAR ASSEMBLAGES BOULONNÉS

2.3.9.1 Généralités sur les assemblages

La réparation des ouvrages par boulonnage ne comporte pas de véritables spécificités liées à la période de construction et des matériaux utilisés. Les règles générales d'assemblage par boulons sur ouvrages neufs s'appliquent, d'où le recours aux règlements et normes en vigueur.

2.3.9.2 Remplacement de boulons

Du fait des modes de fonctionnement différents, le mixage des procédés d'assemblage est incompatible.

Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs boulons surcharge les boulons encadrants et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les boulons défectueux.

> **La réparation des ébranlements, des déconsolidations d'assemblage nécessite toujours une étude préalable, afin :**

- de déterminer s'il s'agit d'un problème isolé, de mode de fonctionnement, de pose ou s'il est nécessaire, pour éviter le retour de l'avarie, de réaliser un renforcement de l'assemblage ;
- de vérifier si le diamètre du boulon définitif est compatible avec les règles de trusquinage (pas, pince). Dans le cas contraire, il y aurait lieu de remplacer les pièces concernées ;
- d'effectuer des contrôles non destructifs, qui peuvent être nécessaires pour s'assurer qu'il n'y a pas de fissures initiées en bord des trous dans les parties non visibles.

Suite à la déconsolidation d'un boulon isolé, celui-ci sera remplacé unitairement par un boulon neuf. Toutefois, en cas d'ovalisation du trou ou de désordre (amorces de fissure en bord de perçage...) un alésage sera nécessaire et le remplacement sera effectué par un boulon neuf de diamètre supérieur. L'alésage définitif avant la pose du boulon de substitution doit avoir fait complètement disparaître l'ovalisation éventuelle du trou engendrée par l'ébranlement.

Suite à la déconsolidation de l'ensemble de l'assemblage, l'alésage sera systématique avec utilisation de boulons neufs d'un diamètre supérieur. Le remplacement des pièces sera envisagé si nécessaire.

2.3.9.3 Assemblages mixtes (extrait de bibliographie [5])

> **Les modes d'assemblage fonctionnent selon des principes très différents :**

- la soudure reconstitue la continuité de la matière ;
- les boulons HR, boulons HRC et les rivetons transmettent les efforts par frottement ;
- les rivets fonctionnent au cisaillement.

Il est donc illusoire de vouloir associer deux de ces moyens pour transmettre un même effort. Remplacer un rivet endommagé par un boulon HR ou un rivelon n'apporte quasiment rien à la résistance d'un assemblage ; le seul mérite d'une telle pratique est d'empêcher la corrosion de se développer au droit du trou à l'interface des deux tôles. L'assemblage est un tout, si un élément est déficient, l'ensemble doit être remplacé.



Fig. 140 : Remplacement de rivets par rivelon sur assemblage rivé (photo Jean-Paul PERSY).

Par souci d'homogénéité, il paraît souhaitable d'utiliser des rivets pour réparer ou renforcer les structures anciennes (contrairement à une idée reçue, il existe encore de nombreuses entreprises qui possèdent le savoir faire et le matériel pour poser des rivets), mais le prix peut être un obstacle à leur utilisation. La possibilité d'utiliser le boulon injecté non précontraint peut être examinée.

2.4.1 GÉNÉRALITÉS

Un **rivet** est un élément d'assemblage définitif. Il se présente sous la forme d'une tige cylindrique, généralement métallique, pleine, qui est munie à l'une de ses extrémités d'une «tête» c'est-à-dire une partie de section plus grande.

L'autre extrémité sera forgée à chaud, de façon à former une tête seconde pour solidariser les éléments à assembler. Cette opération est désignée sous le terme de rivetage.

La construction des ponts en arc, à poutres treillis ou âme pleine, au XIX^{ème} siècle et début du XX^{ème}, avant le développement de la soudure, a largement fait appel à ce mode d'assemblage par **rivetage**.

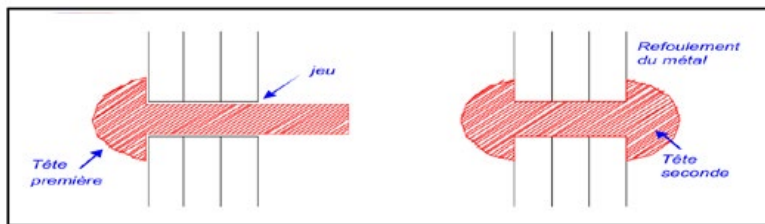


Fig. 141 : Rivet, constitution d'un assemblage.



Fig. 142 : Assemblage rivé (photo Jean-Paul PERSY).

Le rivetage a constitué le principal mode d'assemblage de pièces métalliques jusqu'au développement de la soudure, qui, avec la technique du boulon à haute résistance, l'ont progressivement remplacé dans les années 1960. Aujourd'hui, cette technique est réservée au domaine de la réparation des ouvrages métalliques anciens rivés.

Dans ce qui suit, on désigne par rivet l'ensemble de l'élément de fixation composé d'une tige avec sa tête première formée en usine. La tête seconde sera réalisée en atelier ou sur site lors de la réalisation de l'assemblage.

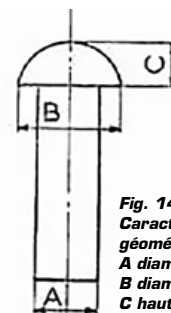


Fig. 143 :
Caractéristiques géométriques d'un rivet :
A diamètre du rivet,
B diamètre de la tête,
C hauteur de la tête.

La pose des rivets s'exécute à chaud par forgeage du métal de la tige au moyen d'outils spécifiques (bouterolles, tas...).

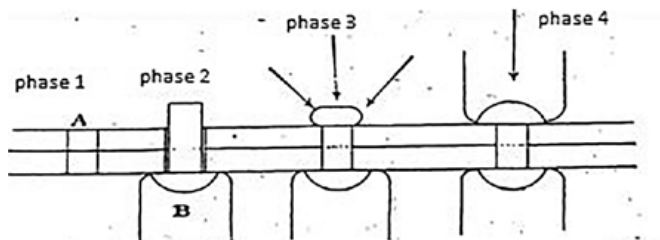


Fig. 144 : Principe du rivetage (photo Jean-Paul PERSY).

> **Schématiquement le rivetage s'effectue en 4 phases :**

- réalisation du trou par perçage, ou poinçonnage avec alésage. Le perçage au chalumeau est interdit ;
- mise en place du rivet à chaud, avec maintien ;
- refoulement du métal de la tige ;
- formation de la tête seconde au moyen d'une bouterolle.

> **Le rivetage permet la réalisation de différents modes d'assemblages :**

- Assemblage bout à bout par couvre joint.
- Assemblage d'angle par l'intermédiaire de cornières.
- Assemblage de semelles par superposition.

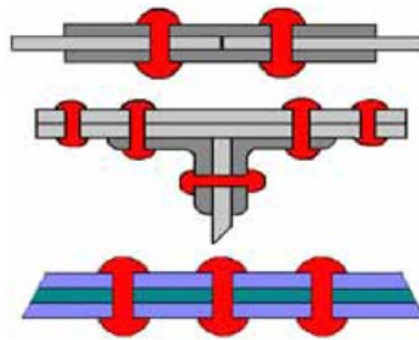


Fig. 145 : Différents modes d'assemblage (document JP Gourmelon).

2.4.2

MODE DE SOLLICITATION DES ASSEMBLAGES RIVÉS

Dans un assemblage rivé, le mode de transmission des efforts s'effectue par sollicitation au cisaillement des tiges des rivets aux interfaces des tôles assemblées. Ceci implique le remplissage parfait des trous par les tiges de rivets.

Compte tenu du refroidissement, donc de la contraction thermique, l'assemblage présente un effort de serrage des pièces, ce qui confère une certaine part de fonctionnement au frottement. Toutefois celui-ci n'est pas pris en compte dans le dimensionnement.

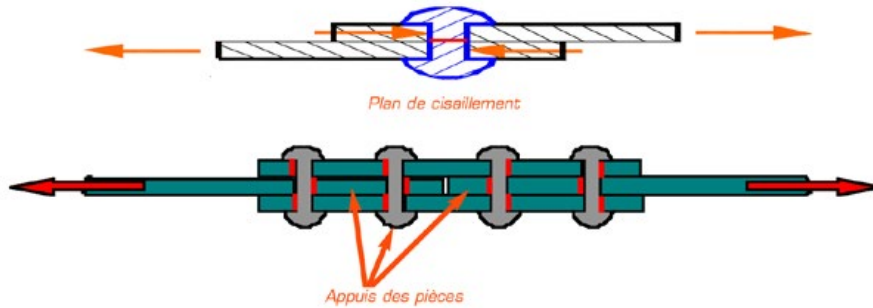


Fig. 146 : Principe de fonctionnement (document JP Gourmelon).

> **Les assemblages rivés se caractérisent par le mode de sollicitation (NF P 22-410) :**

- effort perpendiculaire à l'axe du rivet (cisaillement) ;
- effort parallèle à l'axe du rivet (traction) ;
- effort incliné sur le plan du joint.

Antérieurement la norme NF P 22-410 définissait les conditions de vérification pour ces différentes sollicitations. Ces éléments sont introduits dans l'eurocode.

Effort perpendiculaire à l'axe du rivet (cisaillement)

C'est le cas des assemblages de continuité des poutres. Les efforts sollicitant les éléments assemblés peuvent être principalement des efforts normaux (assemblage des membrures) ou des efforts de cisaillement (assemblage des âmes). La continuité des pièces est assurée par des couvre-joints (figure 147).

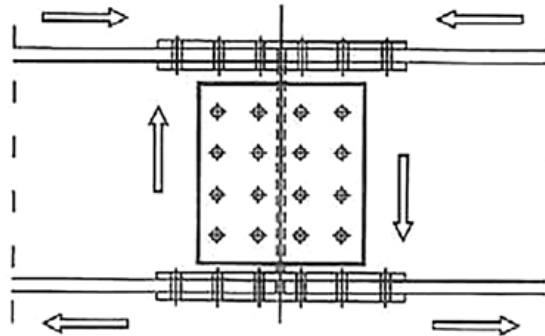


Fig. 147 : Assemblages sollicités perpendiculairement à l'axe des rivets (bibliographie [6]).

Effort parallèle à l'axe du rivet (traction)

Cette disposition se rencontre surtout à l'attache des longerons sur les pièces de pont. Certains constructeurs se contentaient d'attacher l'âme du longeron sur celle de la pièce de pont à l'aide de cornières. La continuité des longerons de part et d'autre des pièces de pont provoque l'apparition de moments de flexion qui sollicitent les têtes de rivets à l'arrachement. Une telle disposition peut, dans les cas extrêmes, provoquer la rupture des rivets (bibliographie [15]).

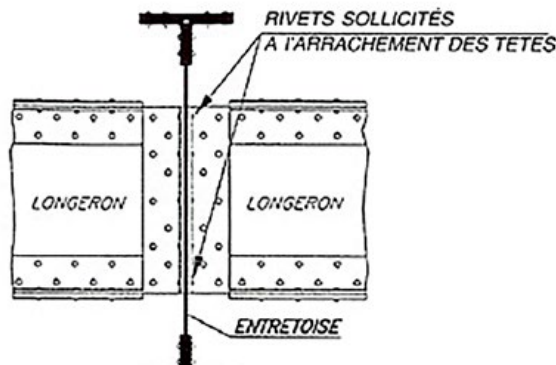


Fig. 148 : Assemblages sollicités parallèlement à l'axe des rivets (bibliographie [15]).

2.4.3 HISTORIQUE RÉGLEMENTAIRE ET NORMATIF

2.4.3.1 L'aspect réglementaire : rivets

Le règlement du 29 août 1891 est le premier à définir des caractéristiques de matériaux pour les éléments d'assemblage. Toutefois ceux-ci s'appliquent uniquement aux ponts rails (bibliographie [2]).

Ce règlement distingue deux matériaux, le fer et l'acier, ce dernier présentant principalement une ductilité plus élevée.

	Résistance à la traction (kg/mm ²)	Allongement (%)
Rivets en fer	36	16
Rivets en acier	38	28

Tableau XXII : Caractéristiques des matériaux - Règlement de 1891 (bibliographie [2])

Comme nous l'avons vu pour les matériaux de construction métallique (partie 1), dans le texte réglementaire du 29 octobre 1913, seuls les rivets en acier subsistent avec les caractéristiques :

	Limite élastique (kg/mm ²)	Rupture (kg/mm ²)	(%)
Rivets	20	38	28

Tableau XXIII : Caractéristiques des matériaux - Règlement de 1913 (bibliographie [2])

Le fascicule 4 titre IV, relatif aux rivets et boulons à haute résistance, a été publié en septembre 1967. Celui-ci renvoie à la norme NF E 27-153, sous réserve des dérogations énoncées dans le fascicule.

> Pour les travaux relevant des services des ponts et chaussées, il distingue deux classes de qualité :

- les rivets en acier A 37 R destinés à la réalisation d'assemblages en acier A 42,
- les rivets en acier A 42 R destinés à la réalisation d'assemblages en acier A 52.

Il spécifie les caractères chimiques et mécaniques des ronds destinés à la fabrication des rivets.

Nature de l'acier	C (%)	S (%)	P (%)
A 37 R	0.160	0.050	0.060
A 42 R	0.180	0.050	0.060

Désignation des aciers	R (hbars)	E (hbars)	A (%)	KCU 20° (daJ/cm ²)
Ronds à rivets	≥ 36.3	≥ 23.5	≥ 28	
A 37 R	≤ 44.1			
Ronds à rivets	≥ 41.2	≥ 25.5	≥ 24	≥ 7
A 42 R	≤ 49			

Tableau XXIV : Caractères chimiques et mécaniques des matériaux - Fasc. 4 titre IV sept. 67

Les dimensions nominales des ronds (commentaire article 6 du fascicule 4 titre IV de septembre 1967) ont été déterminées pour que les barres de diamètres maximaux permis par les tolérances puissent être introduites dans les machines servant à la fabrication des rivets, compte tenu de la dilatation due au chauffage.

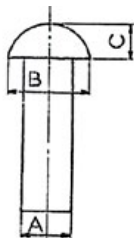
Le tableau ci-dessous indique les diamètres des rivets les plus couramment utilisés dans les ponts et ouvrages métalliques analogues, les diamètres des ronds pour rivets à partir desquels ils sont fabriqués et les tolérances correspondantes sur ces derniers (fascicule 4 titre IV de septembre 1967). Sur ouvrages plus anciens, des assemblages sont régulièrement assurés par des rivets de diamètre 25 mm (sur pièces de pont et poutres principales).

DIAMETRES NOMINAUX		TOLERANCES sur le diamètre des ronds (mm)
Rivets (mm)	Ronds (mm)	
16	15,75	± 0,20
18	17,70	± 0,20
20	19,70	± 0,20
22	21,70	± 0,20
24	23,65	± 0,25
27	26,65	± 0,25

Tableau XXV : Diamètre des rivets et barres et tolérances - Fasc. 4 titre IV sept. 67.

Les têtes premières des rivets en acier A 42 R sont matriciées de telle sorte qu'elles présentent à leur sommet une cuvette (ou un plat) de 12 mm de diamètre sur le fond plat de laquelle est marquée la classe de qualité (fasc. 4 titre IV article 15).

Dans leur grande majorité les rivets utilisés en construction de ponts sont des rivets à tête ronde dont les caractéristiques géométriques sont définies dans la norme NF E 27-153 puis NF E 27 - 156.



Diamètre du rivet A (mm)	Diamètre de la tête B (mm)	Hauteur de la tête C (mm)
16	28	11
18	31	12
20	34	14
22	38	16
24	41	17
27	46	19

Tableau XXVI : Caractères géométriques des rivets - Fasc. 4 titre IV sept. 67.

Les caractéristiques géométriques des têtes sont très utiles en cas d'absence de plans archives pour connaître le diamètre des rivets utilisés.

> **Le fascicule 4 titre IV de septembre 1967 déroge à la norme NF E 27-155 pour les tolérances de fabrication sur le diamètre et sur la longueur moyenne de la tige. Celles-ci sont pour le diamètre par rapport au diamètre nominal :**

- en plus : zéro
- en moins :
 - 0.45 mm pour $d \leq 16$ mm
 - 0.50 mm pour $d = 18$ à 22
 - 0.60 mm pour $d = 24$ et 27 (en dérogation à la norme NF E 27-155)

> **pour la longueur moyenne de la tige :**

- < 1 mm jusqu'au diamètre nominal de 12 mm inclus
- < 2.5 mm pour les diamètres nominaux supérieurs à 12 mm

Le fascicule 4 titre IV de septembre 1967 renvoie à la norme NF E 27-155 pour les autres tolérances telles que renflement sous tête, forme de la tige, dimension de la tête du rivet.

Exceptionnellement, il peut être utilisé des rivets à tête fraisée définis dans la norme NF E 27-154, principalement au droit des appareils d'appui. Les caractères mécaniques qui définissent les rivets sont la dureté Brinell pour les rivets A 37 R et A 42 R et la résilience KCU à + 20° pour les rivets A 42 R.

Désignation des rivets	Dureté Brinell HB	Résilience KCU +20° (daJ/cm ²)
Rivets en A 37 R	105 - 130	/
Rivets en A 42 R	120 - 145	7

Tableau XXVII : Caractères mécaniques des rivets - Fasc. 4 titre IV sept. 67

Les conditions de recette des rivets sont décrites aux articles 21 et 22 du fascicule 4 titre IV.

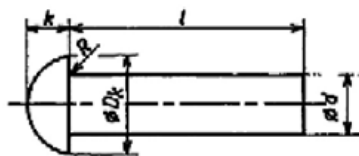
Le fascicule 4 titre IV a été révisé en mars 1983. Il s'appuie sur le support normatif, toutefois le fascicule 66 *Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier* limite, pour la construction des ponts, à l'utilisation des rivets de classe de qualité 37 R et 42 R. Les autres classes de rivets visées par le nouveau fascicule 4 titre IV sont du domaine du bâtiment.

2.4.3.2 L'aspect normatif

En 1967 lors de la parution de la première version du fascicule 4 titre IV, celui-ci faisait référence aux normes de produits NFE 27-153 *Rivets à tête ronde* de novembre 1952 et NFE 27-154 *Rivets à tête fraisée* de novembre 1952.

La norme NFE 27-156 *Rivets à tête ronde pour ouvrages d'art* est parue en juillet 1968. Celle-ci a été révisée en août 1980 sous la désignation *Éléments de fixation - rivets destinés à l'exécution des constructions métalliques*. Une nouvelle révision est intervenue en septembre 1983.

Seules les classes de qualité 37 R et 42 R sont utilisées en Ouvrages d'art.



Symbole : R

- d diamètre de la tige du rivet
- Dk diamètre de la tête du rivet
- K hauteur de la tête du rivet
- L longueur de la tige
- R rayon de l'arrondi sous la tête du rivet

CLASSES DE QUALITES	CLASSES DE QUALITE 24 et 28				CLASSES DE QUALITE 24 et 28, 37R et 42R					
	10	11	12	14	16	18	20	22	24	27
d (1)	nom. 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tol. -0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,60	-0,60
Dk	nom. 17	19	21	24	28	31	34	38	41	46
	Tol. 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60
k	nom. 7	8	9	10	11	12	14	16	17	19
	Tol. 0,8	0,8	0,8	0,8	+1,00	+1,00	+1,00	+1,00	+1,2	+1,2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R max (2)	0,005d									
l (3)	(3)									
	0									
	+2,5									

(1) Le diamètre d de la tige est mesuré à une distance d/2 de l'extrémité de la tige.
(2) Le diamètre de renflement sous tête est mesuré immédiatement sous l'arrondi sous tête et ne doit pas affecter la tige sur une longueur supérieure au diamètre nominal comprenant l'arrondi sous tête.
(3) Les longueurs de tige l sont à choisir de préférence, dans la série de longueurs recommandées en boulonnerie suivant norme NF E 27-025.
La tolérance sur la longueur de tige s'applique à la longueur moyenne de la tige (cas de tiges coupées en biseau peu accentué)

Tableau XXVIII : Caractères géométriques des rivets - NFE 27-156 sept. 83.

Ces valeurs sont analogues à celles du fascicule 4 titre IV de 1967.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES		CLASSES DE QUALITÉ			
		24	28	37 R	42 R
Résistance à la traction N/mm ² (R)	min	360	420	360	420
	max	440	520	440	520
Dureté Brinell HBS	min			105	120
	max			130	145
Résilience KCV à 0 °C J/cm ²	min			35	35

Tableau XXIX : Caractères mécaniques des rivets – NFE 27-156 sept. 83.

Les rivets de classes de qualité 37 R et 42 R doivent être marqués respectivement «37 R» et «42 R», par matricage des têtes premières, de telle sorte que ces têtes présentent à leur sommet une cuvette (ou plat) de 12 mm de diamètre, sur le fond de laquelle le poinçon imprime en relief de 0,7 mm, le symbole de marquage dont les chiffres ont au moins 5 mm de hauteur. Ce marquage est compris dans la hauteur de la tête (article 8).

> La désignation d'un rivet reprend les informations suivantes :

- le diamètre,
- la longueur,
- la classe de qualité,
- la référence à la norme.

Ainsi la désignation d'un rivet sera par exemple : **Rivet R, 20 – 80, 37 R, NF 27-156**

Symboles : R pour les rivets à tête ronde,

RF+ valeur de l'angle de fraisure, pour les rivets à tête fraisée

Il n'existe pas de norme européenne pour ce produit.

2.4.3.3 Assemblages rivés – Dispositions constructives

La norme NF P 22-410 **Construction métallique – Assemblages rivés – Dimensions constructives – Calcul des rivets**, d'avril 1978 révisée en janvier 1982, définit les différentes dispositions des assemblages. La majorité des ouvrages à réparer ont été conçus selon ces règles.

Cette norme s'applique à la construction, au renforcement ou à la réparation des ouvrages en acier. Le fascicule 66 du CCTG spécifie la **classe 2** de la norme, la plus sévère.

> La qualité des rivets doit être adaptée aux nuances d'acier constituant les pièces assemblées :

- classe de qualité 37 R selon NF E 27-156 pour des pièces en acier E 24 ou E 26, soit pour les désignations actuelles S 235 et S 275 (la nuance E 26 n'existant plus) ;
- classe de qualité 42 R selon NF E 22-156 pour des pièces en acier E 30 ou E 36, soit pour les désignations actuelles S 355 (la nuance E 30 n'existant plus).

Les dimensions des rivets relèvent de la norme NF E 27-156.

2.3.3.3.1 Conditions de distance des rivets

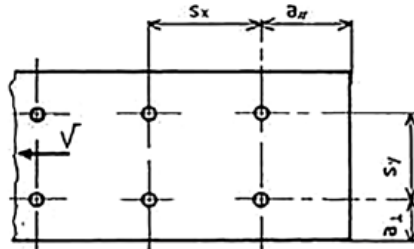


Fig. 149 : Distance des rivets.

> a - distance s entre axe des rivets – classe 2 :

■ files extérieures (sur le pourtour de l'assemblage)

- pour les pièces soumises aux intempéries ou situées dans des conditions favorisant la corrosion (cas général pour les ouvrages d'art) :

$$3d_{tr} \leq s \leq 5 d_{tr}$$

d_{tr} : diamètre définitif des trous

- pour les pièces non soumises aux influences précédentes :

$$3d_{tr} \leq s \leq 10 d_{tr}$$

■ files intérieures (rivets de capitonnage)

$$s \leq 12 t_{min}$$

t_{min} : épaisseur de la plus mince des pièces assemblées.

> b : pince longitudinale $a_{//}$

$$2 d_{tr} \leq a_{//} \leq 2.5 d_{tr}$$

pour les goussets pincés entre deux pièces assemblées

$$2 d_{tr} \leq a_{//} \leq 4 d_{tr}$$

> c : pince transversale a_{\perp}

$$1.5 d_{tr} \leq a_{\perp} \leq 2.5 d_{tr}$$

2.3.3.3.2 Conditions d'épaisseur des pièces assemblées

Les conditions suivantes sont à vérifier : $\geq \leq$

> a : Epaisseur des pièces élémentaires : les pièces assemblées étant classées par ordre d'épaisseurs décroissantes, en appelant t_2 l'épaisseur de la seconde :

$$d \geq t_2 + 2 \text{ mm} \quad \text{si} \quad t_2 \leq 20 \text{ mm}$$

$$d \geq 22 \text{ mm} \quad \text{si} \quad t_2 \geq 20 \text{ mm}$$

d : diamètre nominal des rivets

> **b : Epaisseur totale Σt :**

$$\Sigma t \leq 4d$$

> **c : Pression diamétrale (selon norme NF P 22-410) :**

$$\frac{|V_1|_{\max}}{d_{tr} \cdot t} \left[1 + k \frac{|-V_1|_{\max}}{|V_1|_{\max}} \right] \leq 1.8\sigma_e$$

avec $k = 0.3$ pour des pièces assemblées en S 235 (anciennement E 24 et E 26)

avec $k = 0.9$ pour des pièces assemblées en S 355 (anciennement E 30 et E 36)

$|V_1|_{\max}$: Valeur absolue de l'effort maximal V_1 pour des structures soumises à la fatigue.

$|-V_1|_{\max}$: Valeur absolue maximale de sens contraire à $|V_1|_{\max}$, $|-V_1|_{\max} \leq |V_1|_{\max}$

σ_e : limite élastique du métal constituant les pièces assemblées.

2.3.3.3.3 Section de calcul

> On compte sur une section A mm² du rivet posé qui prend les valeurs suivantes en fonction de l'épaisseur totale Σt des pièces assemblées :

$$A = \frac{\Pi}{4}(d+1)^2 \quad \text{si } \Sigma t \leq 4(d+1)$$

$$A = \frac{\Pi}{4}(d+1)^2 - 1.5[\Sigma t - 4(d+1)] \quad \text{si } 4(d+1) \leq \Sigma t \leq 5(d+1)$$

$$A = \frac{\Pi}{4}(d+1)^2 - 1.5(d+1) \quad \text{si } \Sigma t \geq 5(d+1)$$

Les valeurs de k à retenir pour les vérifications ci-dessous sont :

$k = 0.25$ pour les pièces assemblées en E24 ou E26 ;

$k = 0.80$ pour les pièces assemblées en E30 ou E36.

> **Rivet soumis à un effort perpendiculaire à l'axe des boulons (cisaillement). On vérifie la condition :**

$$\frac{1.25}{mA} |V_2|_{\max} \left[1 + k \frac{|-V_2|_{\max}}{|V_2|_{\max}} \right] \leq \sigma_e$$

> **Rivet soumis à un effort parallèle à l'axe des boulons (traction). On vérifie la condition :**

$$\frac{1.25}{A} N_{\max} \left[1 + k \frac{|-N|_{\max}}{|N|_{\max}} \right] \leq \sigma_e$$

> **Rivet soumis à un effort incliné sur le plan du joint. En plus des deux vérifications précédentes, on doit avoir :**

$$\frac{1.25}{A} \sqrt{N^2_{\max} + \left(\frac{V_2}{m}\right)^2_{\max}} \leq \sigma_e$$

2.4.3.4 Assemblages rivés – Exécution des assemblages

La norme NF P 22-411 *Construction métallique – Assemblages rivés – Exécution des assemblages*, d'avril 1978, définit les différentes dispositions d'exécution des assemblages.

Cette norme s'applique à la construction, au renforcement ou à la réparation des ouvrages en acier. Le fascicule 66 du CCTG spécifie la **classe 2** de la norme, la plus sévère.

La norme européenne NF EN 1090-2 *Exécution des structures en acier et des structures en aluminium – Partie 2 : Exigences techniques pour l'exécution des structures en acier* amène à introduire les compléments et précisions par rapport à la norme française NF P 22-411 (parties de texte surlignées).

2.3.3.4.1 Perçage des trous

En classe 2, le diamètre des trous est supérieur de 1 mm à celui des rivets, quel que soit le diamètre nominal.

La norme NF EN 1090-2 reprend cette valeur pour les classes d'exécution EXC3 et EXC4 qui seront vraisemblablement à retenir pour les ponts.

Les trous sont percés, soit par forage, soit par poinçonnage suivi d'un alésage. Les trous poinçonnés doivent avoir, du côté de la débouchure, un diamètre inférieur de 3 à 4 mm au diamètre définitif, selon que l'épaisseur des pièces est inférieure ou supérieure à 10 mm. La norme NF EN 1090-2 porte cette prescription à un minimum de 2 mm pour les classes d'exécution EXC3 et EXC4, le poinçonnage sans alésage n'est pas autorisé.

L'utilisation de forets alésoirs (forets étagés ou non) est autorisée en perçage au paquet.

Quel que soit le mode de perçage, les trous relatifs à un même rivet pour des éléments superposés doivent se correspondre d'une pièce à l'autre. Il est accordé une tolérance de un millimètre au plus d'excentricité à condition de faire disparaître cette différence à l'alésoir.

Si cette prescription n'est pas satisfaite, il est loisible de réaléser, sur autorisation du maître d'œuvre, tous les trous au diamètre immédiatement supérieur, avec mise en place des rivets correspondant au nouveau diamètre. Si toute l'excentricité n'a pas alors disparue, la pièce est rebutée.

> **Quel que soit le mode de perçage, les tolérances d'espacement et d'alignement des trous sont à considérer en fonction des dessins d'exécution qui fixent :**

- la position d'ensemble des trous par rapport aux cotes d'assemblage des pièces,
- la position relative des trous entre eux.
- Par rapport aux cotes théoriques, l'axe réel du rivet doit se trouver à l'intérieur d'un cercle de rayon r centré sur l'axe théorique.

$$r = 1 \text{ mm} \quad \text{pour tous les diamètres } d_r$$

2.4.3.4.2 Assemblage

Lorsque la transmission des efforts, ou d'une partie de ceux-ci, doit s'effectuer par contact direct, les surfaces en contact sont dressées pour assurer la transmission de l'effort par toute la section.

L'affleurement des âmes aux talons des cornières, le contact des tranches de joints, le rabotage des excédents de largeur des plats, ne sont exigés que si le marché le prévoit.

Les surfaces en contact sont décalaminées, dérouillées à la brosse métallique et nettoyées. Le rivetage sans nettoyage des interfaces après forage au paquet est interdit.

> Si les documents du marché le prévoient, les surfaces en contact reçoivent une protection contre la corrosion (peinture, galvanisation à chaud, métallisation...). Les principes suivants peuvent être appliqués :

- entre deux pièces neuves (type semelles) : pas d'application de peinture sur entrefers,
- entre deux pièces anciennes (conservées) ou entre une pièce neuve et une pièce ancienne : application de peinture anticorrosion sur entrefers.

Après avoir été dressé et ajusté, l'assemblage provisoire des éléments sera réuni à l'aide de serre-joints ou avec des boulons de montage ayant sensiblement le même diamètre que les rivets définitifs. Cet assemblage ne doit provoquer ni tension, ni bâillement dans les pièces.

Au cours de l'assemblage provisoire, les trous en regard doivent respecter les tolérances de co-axialité, d'espacement et d'alignement ci-dessus. Si ce n'est pas le cas, l'agrandissement du passage par brochage ou oxycoupage est interdit. Les boulons de montage sont à poser en quinconce (cas des semelles) à raison de 1 boulon tous les 2 trous (minimum), 1 boulon dans chaque trou dans le cas de pièces fortement sollicités.

Les corps de rivets doivent avoir une longueur suffisante pour permettre, outre la confection de têtes bouterollées (têtes secondes), le remplissage intégral des trous et éviter l'empreinte des bouterolles dans les éléments assemblés.

> La norme ne donne pas de règle pour la détermination de la longueur de rivet, les pratiques de la profession sont :

- pour les rivets à tête ronde : $L = 1.10 E + 1.50 \phi$,
- pour les rivets à tête fraisée : $L = 1.10 E + 0.75 \phi$

avec E : épaisseur des pièces à assembler et ϕ : diamètre du rivet

La longueur théorique doit parfois être adaptée en fonction de réductions de métal présentes sur certaines pièces. Dans ce cas des essais préalables avec différentes longueurs de rivets sont nécessaires avant d'entreprendre une longue séance de rivetage.

La pose s'effectue avec un pas de 4D maxi et une pince généralement de 1,5D.

Les rivets sont portés à la température de 950° C (rouge cerise) et sont posés après élimination éventuelle de la calamine adhérente. Les rivets brûlés doivent être éliminés.

La NF EN 1090-2 développe cette phase : « Chaque rivet doit être chauffé uniformément sur toute sa longueur, sans brûlure ni calaminage excessif. Il doit être porté au rouge vif de la tête à la pointe au moment de son insertion, et refoulé sur la totalité de sa longueur tant qu'il est brûlant, de façon à remplir complètement le trou. Un soin particulier doit être apporté à la chauffe et à la pose des rivets longs. Chaque rivet doit être débarrassé de sa calamine en le frappant alors qu'il est brûlant contre une surface dure, après la chauffe et avant l'insertion dans le trou. »

Les têtes de rivets doivent être centrées sur la tige avec une tolérance de 0,15 dtr [cette valeur est reprise dans la NF EN 1090-2] et leur contact avec la pièce doit être satisfaisant. La tête formée doit l'être correctement ; cette opération ne doit laisser aucune empreinte sur les pièces assemblées.

Les têtes de rivets ne doivent présenter ni gerçures, ni déchirures.

En aucun cas, il n'est permis de bouteroller les rivets entre 500° C et l'ambiante.

La pose doit commencer au milieu du rang. Dans le cas de rangées parallèles de rivets, le rivetage doit progresser uniformément et simultanément dans toutes les rangées.

2.4.3.4.3 Contrôle des rivets

Les rivets, qui doivent satisfaire aux prescriptions d'assemblage ci-dessus, font l'objet d'un contrôle visuel qui porte sur les têtes de rivets.

Le contrôle du serrage des pièces par le rivet est effectué en sonnant les rivets par martelage avec une masse de l'ordre de 500 grammes.

La NF EN 1090-2 précise les critères d'acceptation :

- Les têtes de rivets doivent être centrées. Le décentrage de la tête par rapport à l'axe de la tige ne doit pas être supérieur à 0,15 d_0 , où d_0 est le diamètre du trou.
- Les têtes de rivets doivent être bien formées et ne doivent présenter ni gerçures, ni cratères.
- Les rivets doivent présenter un contact satisfaisant avec les pièces assemblées, aussi bien au niveau de la surface extérieure des épaisseurs que dans le trou. Aucun mouvement, ni vibration ne doit être détectée lorsque la tête du rivet est tapotée légèrement à l'aide d'un marteau.
- Une légère collerette régulière et bien centrée ne peut être acceptée que si un nombre restreint de rivets du groupe sont concernés.
- Les faces extérieures des pièces qui ne doivent pas présenter de marque causée par la riveteuse peuvent être spécifiées.

Pour le changement des rivets défectueux et si nécessaire, les trous sont alésés au diamètre immédiatement supérieur aux dimensions des rivets éliminés et les éléments assemblés endommagés doivent être réparés.

2.4.3.4.4 Travaux de réparation : dérivetage

En cas de rivet mal posé, les travaux de dérivetage seront conduits avec précaution. Ceux-ci sont interdits si la température du métal est inférieure à 5°C.

> Les phases de dérivetage sont :

- Coupe des têtes à la tranche ou élimination de la tête par oxycoupage (sans blesser les pièces à conserver...) dans le cas de pièces en fer ou en acier. Dans le cas de faibles sections, il y a risque de fissuration et il sera préférable de procéder par perçage.
- Chasse du rivet à l'aide d'un marteau équipé d'un outil adapté au diamètre de la tige du rivet.
- Maintien des pièces sur l'envers lors du dérivetage

Sur matériau fragile, lors du dérivetage, seul le perçage sera utilisé compte tenu du risque de rupture des pièces.

En cas de détérioration, les trous pour les nouveaux rivets seront alésés au diamètre immédiatement supérieur aux dimensions des rivets éliminés.

Dans le cas de modifications, les trous des éléments neufs sont, de préférence, contre-perçés sur place. Il est également possible de procéder à un pré-perçage d'après un gabarit des trous existants relevé sur place ; dans ce cas, les dessins doivent indiquer le diamètre de ce pré-perçage, qui doit correspondre à un alésage d'au moins 2 mm supérieur au diamètre primitif.

2.4.4 LA PRATIQUE DE RÉPARATION PAR RIVETAGE

La pratique du rivetage est actuellement réservée au domaine de la réhabilitation des ouvrages dans le cadre de réparation ou de renforcement. Elle concerne des ouvrages anciens assemblés par rivetage dont les propriétés de soudabilité des aciers constitutifs peuvent entraîner des difficultés de réalisation ou de maintenance.

Cette technique est employée dans le cas de remplacement de pièces (rivets, cornières, plats...) ou d'ajouts de plats, cornières, couvre-joint... Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs rivets surcharge les rivets encadrants et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les rivets défectueux.

L'utilisation de rivets est parfois remplacée par l'emploi de boulons HR, de rivelons, de boulons calibrés... Toutefois le mode de fonctionnement étant différent (cisaillement pour les rivets, frottement pour les boulons HR, rivelons...) il est illusoire de vouloir associer deux de ces moyens pour transmettre un même effort. Remplacer un rivet endommagé par un boulon HR ou un rivelon n'apporte quasiment rien à la résistance d'un assemblage ; le seul mérite d'une telle pratique est d'empêcher la corrosion de se développer au droit du trou à l'interface des deux tôles.

Les réparations des ébranlements nécessitent toujours une étude préalable par le bureau d'étude en connaissance précise des désordres rencontrés et des évolutions possibles et des règles de trusquinage (pas : 4D maxi, pince : 1,5D généralement) et d'encombrement.

Dans le cas de tabliers en fer puddlé ou en acier doux ancien, des contrôles non destructifs peuvent être nécessaires pour s'assurer qu'il n'y a pas de fissures initiées au niveau des trous de rivets dans les parties non visibles (sur les âmes des longerons, sous les cornières membrures ou montantes par exemple).

Ces travaux doivent donc être réalisés par des entreprises qualifiées et nécessitent une surveillance continue.

Une réparation par rivetage débute généralement par une phase de dérivetage du rivet ancien. Cette opération est interdite si la température du métal est inférieure à 5°C et réalisée par coupe à la tranche ou élimination de la tête au chalumeau équipé d'une buse à bec plat.

Dans le cas de risque de fissuration (faibles section) ou de matériau fragile le perçage sera préféré.



Fig. 150 : Coupe d'une tête de rivet - (crédit photos Eiffel).

Le corps du rivet est ensuite chassé au marteau pneumatique équipé d'une broche conique. Le positionnement de la pièce de remplacement conduit généralement à réaligner les trous par un alésage au diamètre supérieur afin d'éliminer tout décalage et ovalisation éventuelle.

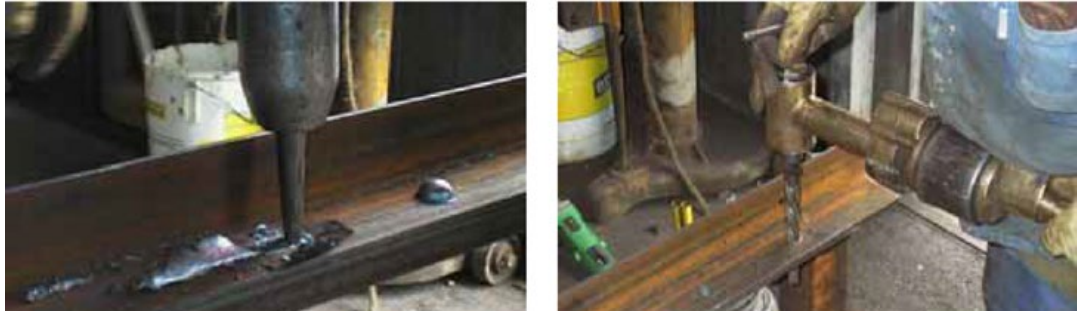


Fig. 151 : Chasse du corps du rivet et alésage du trou au diamètre supérieur (photos Eiffel).

Les rivets sont portés à température, conformément à la norme NF EN 1090-2 (§ 4-d-2) au moyen de four à fuel sous pression, à propane ou de four électrique.

La mise en place se fait à chaud, la tête première est maintenue en position au moyen de tas pneumatique, la tête seconde est formée au moyen d'une bouterolle. Après refroidissement, la légère collerette formée est éliminée par gougeage.



Fig. 152 : Pose d'un rivet à tête ronde et gougeage de la tête de rivet (photos Eiffel).

Le contrôle des rivets posés sera réalisé conformément à la norme par examen visuel des têtes et par sondage au marteau (2.4.3.4.3).

BIBLIOGRAPHIE

- 1 **Historique et analyse des règlements jusqu'en 1940 de calculs des ouvrages d'art métalliques et suspendus** – R. Lafuente – BLLCPC 172 mars-avril 1991.
- 2 **Règlements de calcul des ponts métalliques** – J. Roche et J. Raoul : Bulletin Ponts Métalliques n°20 - OTUA
- 3 **Matériaux pour ouvrages d'art métalliques** – JP Gourmelon : Bulletin Ponts Métalliques n°20 - OTUA
- 4 **Réparation et renforcement par soudure d'OA en fer puddlé** – JP Persy – BLLPC 130 mars-avril 1984.
- 5 **Réparation par soudure d'OA métalliques anciens** – JP Persy – BLLPC 167 mai-juin 1990.
- 6 **Travaux de construction en acier** - Guide du Maître d'œuvre – SETRA 2001
- 7 **Des aciers pour les ponts** – M. Lafrance, R Hubo, C Perdrix : Bulletin Ponts Métalliques n°20 - OTUA
- 8 8a **Les aciers thermomécaniques – Une nouvelle génération d'aciers à hautes performances** – OTUA – mai 1997
8b **Les aciers à haute limite d'élasticité** – AFGC – octobre 2012
- 9 **Deux siècles de ponts métalliques** - JC Foucriat : Bulletin Ponts Métalliques n°20 - OTUA
- 10 **OTUA – Propriétés d'emploi des aciers – L'essai de traction** par Marc Grumbach et Louis Roesch
- 11 **OTUA – Courrier technique n°62 – Les caractéristiques mécaniques des aciers : quelles valeurs, quelle signification ?**
- 12 **Profilés métalliques anciens – Données sur la géométrie** – P Trouillet, J Schwartz, R Jolliot – BLLPC 157 sept.-oct. 1988.
- 13 **Bases de choix des aciers en construction métallique** : OTUA - édition 1985 et actualisation 1998.
- 14 14a **Note d'information sur les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique.**
SETRA – 30 avril 1982 – Document provisoire.
14b **Aciers autopatinables Recommandations pour leur utilisation en structure des ponts et passerelles.**
Note d'information n°2, avril 2015, CEREMA – IFSTTAR
- 15 **Maintenance et réparation des ponts** – chapitre 5 : **Le projet de réparation ou de renforcement des ponts métalliques** – Philippe LECROQ – Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées – juillet 1997.
- 16 **Les réparations de ponts métalliques : Réparations types et cas concrets de réhabilitations** document SNCF
- 17 **Courbes dureté / paramètre de refroidissement en condition de soudage** – IRSID 1977 18 La rupture par fatigue des aciers, LIEURADE H.-P. (1987), collection IRSID-OTUA.
- 19 **Ponts métalliques et mixtes – Résistance à la fatigue - Guide de conception et de justification** (SETRA – CTICM - SNCF, mai 1996)
- 20 **GETZOV B. (1931), Xè congrès Chimie industrielle, Chim. et Ind., 25.**
- 21 Office Central de la Soudure Autogène (1937), **Ségrégation, soudabilité, influence des teneurs en phosphore et soufre et de la désoxydation par l'aluminium**, nov.
- 22 **Boulons à serrage contrôlé** : Le nouveau fascicule du CCTG et la marque nationale de conformité aux normes par JP Gourmelon et J Jacquet – Bulletin Ponts Métalliques – OTUA – 1984.
- 23 **Exécution des structures métalliques** – La nouvelle norme européenne EN 1090 – EN 1090-2 : Principales options et normes associées – J.P. Gourmelon – Formation PFE – ENPC 2008.
- 24 Guide technique **Entretien de la protection anticorrosion des ouvrages métalliques** publié par le LCPC – décembre 2005.
- 25 Fiche n°XVIII-1 **Protection contre la corrosion - Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art** – MEMOAR- Collection de fiches techniques – SETRA.
- 26 Fiche n°XVII-1 **Les assemblages soudés - Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art** – MEMOAR- Collection de fiches techniques – SETRA.
- 27 **Prescriptions techniques pour la surveillance et la maintenance des ouvrages d'art** – chapitre ouvrages métalliques et mixtes – SNCF réf : EF 9 E n°1
- 28 Guide R1010neo du CETIM - **Chaudes de retrait** - Guide pratique : **effets sur les propriétés d'emploi des aciers et des alliages d'aluminium**

TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Fig. 1 : **Transformations allotropiques du fer** (document OTUA)
- Fig. 2 : **Diagramme de phases Fer – Carbone** (diagramme simplifié) (document Jean-Paul Persy)
- Fig. 3 : **Courbe de traction et caractéristiques mécaniques** (document OTUA)
- Fig. 4 : **Schéma de principe d'un essai de résilience : mouton pendule et éprouvette à entaille en V** (document OTUA)
- Fig. 5 : **Historique des ouvrages d'art métalliques (jusqu'en 1940)** (document Jean-Paul PERSY)
- Fig. 6 : **Structure métallographique d'une fonte phosphoreuse à graphite lamellaire** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 7 : **Pont de Coalbrookdale sur la Severn** (document bibliographique)
- Fig. 8 : **Métallographie sur fer puddlé** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 9 : **Schéma convertisseur Thomas** (document OTUA)
- Fig. 10 : **Schéma d'un four Martin** (document OTUA)
- Fig. 11 : **Structure métallographique ferrite – perlite d'un acier ancien (C : ~ 0.18%)** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 12 : **Variations de R, Re et A % pour les aciers obtenus par divers procédés d'élaboration.** Selon Getzov – 1931
- Fig. 13 : **Influence du phosphore sur les caractéristiques des aciers doux.** Selon Soudure Autogène (1937)
- Fig. 14 : **Schéma fours à l'oxygène** (document OTUA)
- Fig. 15 : **Évolution métallurgique des aciers de construction** (valeurs typiques pour des tôles de 50 mm)
- Fig. 16 : **Évolution dans le temps des nuances et modes d'élaboration des aciers de construction**
- Fig. 17 : **Ouvrage en acier à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique : pont de Bessèg** (photo J Richard-Ducros)
- Fig. 18 : **Montage des voussoirs en acier moulé du pont Alexandre III** (revue Ponts Métallique n°20 – OTUA)
- Fig. 19 : **Poutres métalliques – Évolution des coupes types** (document JP Gourmelon)
- Fig. 20 : **Tôles profilées en long – a : différentes formes possibles – b : caractéristiques et grosseur de grains selon l'épaisseur** (document SACILOR)
- Fig. 21 : **Rupture d'une diagonale tendue sur un point de soudure** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 22 : **Fragilité au choc sur acier des années 1920 env.** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 23 : **Inclusions sur zone de rupture d'une éprouvette de traction : Acier A 52 S γ - ~ 1970** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 24 : **Porosité dans la masse d'un acier des années 1970 env.** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 25 : **Dédoubleurs sur essais de laboratoire et sur ouvrage** (photo Jean-Paul Persy)

- Fig. 26 : **Pailles sur éprouvette d'essai et sur ouvrage** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 27 : **Prélèvement en extrémité de pièce pour analyse chimique et examen métallographique**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 28 : **Piles dites « par aération différentielle »** (document JP Gourmelon)
- Fig. 29 : **Piège à poussière, maintien de l'humidité, végétation, foyer de corrosion**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 30 : **Renforts de membrure inférieure formant piège à eau et / ou piège à poussière**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 31 : **Enrouillement, et début de corrosion sur zone condensante en sous-face d'une membrure inférieure de pièce de pont** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 32 : **Corrosion feuilletante d'une membrure inférieure d'une poutre d'un pont à poutrelles enrobées**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 33 : **Corrosion feuilletante d'un gousset sur un ouvrage des années 1960** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 34 : **Corrosion foisonnante sur dédoubleure sur une poutre caisson élégie** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 35 : **Corrosion foisonnante entraînant une importante traction sous tête des rivets**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 36 : **Corrosion d'écrous** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 37 : **Corrosion fissurante sur assemblage boulonné de tige d'ancrage** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 38 : **Contraintes dans un assemblage boulon écrou** (document CETIM)
- Fig. 39 : **Corrosion des têtes de rivet, risque de perte de résistance à la traction sous tête**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 40 : **Dégradation des têtes de rivet par corrosion** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 41 : **Membrure inférieure corrodée latéralement, conservée après vérification par calcul et traitement anticorrosion** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 42 : **Dégradation, avec écrasement de la zone d'appui d'une poutre encastree, affaiblissement par corrosion** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 43 : **Corrosion de pièce noyée dans la maçonnerie. Perforation de l'âme, corrosion des cornières de membrures au contact de la maçonnerie** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 44 : **Corrosion galvanique d'un garde-corps en alliage d'aluminium fixé sur montants « acier »**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 45 : **Série de potentiels électrochimique de quelques matériaux** (potentiels standards par rapport à l'électrode normale à l'hydrogène)
- Fig. 46 : **Effondrement du pont de Sully sur Loire en janvier 1985** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 47 : **Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 48 : **Forme des courbes de traction en fonction de la température** (Biblio OTUA)
- Fig. 49 : **Exemple d'essais de traction sur acier ductile et fragile** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 50 : **Propagation de la rupture fragile**
- Fig. 51 : **Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre** (photo Jean-Paul Persy)

- Fig. 52 : **Fissures, amorces de rupture, suite à un choc de bateau sur acier fragile d'une membrure inférieure de pont** (photo CETE Méditerranée)
- Fig. 53 : **Ruptures sur acier fragile par chocs de véhicules – acier des années 1925 environ** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 54 : **Choc de véhicule sur un arc en fonte de 1903** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 55 : **Familles de courbes de Wölher**
- Fig. 56 : **Catégories de détail des principaux assemblages sans les ponts routiers métalliques et mixtes**
- Fig. 57 : **Fissuration par fatigue de tôle de platelage sous l'effet de la circulation – ici platelage de 10 mm sur autoponts** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 58 a et b : **Fissuration d'augets discontinus au droit des pièces de pont de platelage orthotrope avec prolongement sous platelage** (photos Jean-Paul Persy)
- Fig. 59 : **Fissure frontale d'une semelle additionnelle de membrure inférieure de poutre** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 60 : **Raccordement des semelles additionnelles recommandé** (document Jean-Paul Persy)
- Fig. 61 : **Défaut de pose de rivet** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 62 : **Défaut de longueur de tige de rivet** (photo SNCF)
- Fig. 63 : **Fissuration sur trou de rivet** (photo SNCF)
- Fig. 64 : **Corrosion de rivets** (photos Jean-Paul Persy)
- Fig. 65 : **Dégradation des rivets (à gauche) et assemblages (à droite) par déconsolidation** (photos SNCF)
- Fig. 66 : **Différents stades de déconsolidation d'un assemblage rivé** (photo SNCF)
- Fig. 67 : **Effet de cisaillement sur un corps de rivet** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 68 : **Rupture d'un rivet par cisaillement** (photo SNCF)
- Fig. 69 : **Corrosion spécifique des écrous d'une attache basse de suspente de pont suspendu** (photo Menou LCPC)
- Fig. 70 : **Déconsolidation d'un assemblage boulonné non précontraint d'une diagonale d'une poutre treillis avec disparition d'un boulon de l'assemblage** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 71 : **Glissement des pièces au niveau d'un joint de rabotage sous effort excessif (effondrement partiel de l'ouvrage). Mise en évidence par rupture du feuil de peinture et mise à nu de la sous couche au minium de plomb** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 72 : **Type et position des cassures** [CETIM info]
- Fig. 73 : **Coupe d'un boulon HR galvanisé rompu par fragilisation par l'hydrogène** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 74 : **Rupture par dépassement des efforts en pression diamétrale sur une charpente** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 75 : **Sur ouvrage d'art, rupture par dépassement des efforts en pression diamétrale pour l'âme, par excès de traction pour le couvre-joint de la membrure inférieure** (photo Jean-Paul Persy)

- Fig. 76 et 77 : **Évolution des caractéristiques mécaniques des aciers en fonction de la température**
- Fig. 78 : **Pont routier en Alabama USA – 5 janvier 2002 – incendie d'une citerne d'hydrocarbures**
(document internet)
- Fig. 79 : **Pont sur le Mungo – Cameroun – 2 juillet 2004 – incendie d'un camion-citerne d'hydrocarbures**
(document internet)
- Fig. 80 et 81 : **Pont Mathilde Rouen – 29 octobre 2012 – accident d'un camion-citerne sur l'ouvrage et propagation de l'incendie sous l'ouvrage** (documents internet)
- Fig. 82 : **Voilement d'âme en cours de lancement** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 83 : **Flambement de membrure supérieure de la poutre de rigidité dans le plan**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 84 : **Flambement de membrure supérieure de la poutre de rigidité hors du plan**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 85 : **Choc de véhicule sur ouvrage moderne – déformations de la membrure inférieure et de l'âme de poutre** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 86 : **Effondrement par fait de guerre d'un pont à haubans** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 87 : **Principe d'ancrage de barres de précontrainte** (bibliographie [15] – schéma Lecroq)
- Fig. 88 : **Remplacement d'un montant d'une poutre treillis – dispositif provisoire de reprise des efforts par barres de précontrainte** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 89 : **Remplacement de gousset**
- Fig. 90 : **Ajout de matière**
- Fig. 91 : **Ajout de matière sous la membrure inférieure entre lignes de rivets (Pont de Douarnenez)**
(photos Jean-Paul Persy)
- Fig. 92 : **Renforcement par placage d'une poutre en I**
- Fig. 93 : **Déconsolidation d'assemblage rivé avec rupture de rivet** (photo SNCF)
- Fig. 94 : **Fissuration par concentration de contrainte en zone de fort bridage** (photo CETE Méditerranée)
- Fig. 95 a et b : **Désordre de fatigue et réparation avec gousset d'épanouissement** (photos Jean-Paul Persy)
- Fig. 96 : **Réparation par placage d'une âme de longeron fissuré par fatigue** (schéma SNCF)
- Fig. 97 : **Schéma de rechargement par soudure**
- Fig. 98 : **Schéma d'une fourrure soudée**
- Fig. 99 : **Comportement des aciers à température élevée – norme NF P 92-702**
- Fig. 100 : **Modification souhaitable** (photo Yves Picard)
- Fig. 101 : **Corrosion à traiter lors de la remise en peinture de l'ouvrage** (photo Yves Picard)
- Fig. 102 : **Rupture du dispositif anti-cheminement sur appareil d'appui à balancier** (photo Yves Picard)
- Fig. 103 : **Cheminement d'appareil d'appui à rouleaux** (photos Jean-Paul Persy)
- Fig. 104 : **Défaut de contact - défaut de planéité par déformation de retrait de la soudure âme – membrure inférieure** (photos Jean-Paul Persy)

- Fig. 105 : **Défaut de contact d'un appareil néoprène par défaut de parallélisme des surfaces**
(photos Jean-Paul Persy)
- Fig. 106 : **Cycle thermique de soudage**
- Fig. 107 : **Structures de transformations métallurgiques de soudage – Acier de type E 36 C-Mn, normalisé – Attaque au nital 3% (IRSID bibliographie [17])**
- Fig. 108 : **Diagramme de transformation en refroidissement continu en condition de soudage (IRSID bibliographie [17])**
- Fig. 109 : **Courbes dureté – paramètre de refroidissement – Aciers E 36 au C – Mn et aciers à dispersoïdes à Cég analogues (IRSID bibliographie [17])**
- Fig. 110 : **Déformations par bridage de soudure** (doc. Entreprise Eiffel)
- Fig. 111 : **Exemples de différents cas de bridage** (d'après IIS -IX61042-77)
- Fig. 112 : **Arrachement lamellaire** (bibliographie [6])
- Fig. 113 : **Fissuration à froid** (bibliographie [6])
- Fig. 114 : **Principe du soudage à l'arc avec électrode enrobée** (bibliographie [6])
- Fig. 115 a et b : **Soudage à l'arc avec fil fourré** (bibliographie [6])
- Fig. 116 a et b : **Soudage des goujons** (bibliographie [6])
- Fig. 117 : **Soudure oblique sur fer puddlé** (bibliographie [4])
- Fig. 118 : **Soudures d'angle. Formation de caniveau** (bibliographie [4])
- Fig. 119 : **Soudure d'angle. Reprise au raccordement** (bibliographie [4])
- Fig. 120 : **Méthode de beurrage du chanfrein** (bibliographie [4])
- Fig. 121 : **Distribution de contrainte autour de particules sphériques ou anguleuses** (bibliographie [5])
- Fig. 122 : **Pont Pigeaud – assemblages par boulons ordinaires** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 123 : **Pont Warren sur le Rhin - Construction soudée – assemblages boulons HR (~1965)**
(photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 124 : **Assemblages boulonnés sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons**
(bibliographie [6] SETRA)
- Fig. 125 : **Assemblage boulonné sollicité parallèlement à l'axe des boulons (déconseillé pour les ponts)** (bibliographie [6] SETRA)
- Fig. 126 : **Principe des assemblages précontraints travaillant au frottement** (bibliographie [6] SETRA)
- Fig. 127 : **Principe de fonctionnement des assemblages précontraints sollicités par des efforts de traction parallèle à l'axe des boulons** (bibliographie [6] SETRA)
- Fig. 128 : **Assemblage par boulons HR sollicités parallèlement à l'axe des boulons – défaut d'alignement dû au retrait de soudage** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 129 : **Boulon HR de type courant** – (Fascicule 4 titre IV)
- Fig. 130 : **Boulon HR à tête à embase** - (Fascicule 4 titre IV)
- Fig. 131 : **Exemple de marquage sur la tête de vis** (document UTN)

- Fig. 132 : **Principales conditions de choix dimensionnel des boulons**
- Fig. 133 : **Entraxe des boulons, pinces longitudinales, pinces transversales – classe 2 - NF P 22-460 art. 6.1.2**
- Fig. 134 : **Différence d'épaisseur entre éléments d'un même assemblage** (NF EN 1090-2)
- Fig. 135 : **Boulon HRC** (photo GFD)
- Fig. 136 : **Boulon HRC – technique de mise en œuvre** (doc. GFD)
- Fig. 137 : **Boulon injecté dans un assemblage à double recouvrement** (NF EN 1090-2 annexe K)
- Fig. 138 : **Rivelons** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 139 : **Rivelon – mise en œuvre**
- Fig. 140 : **Remplacement de rivets par rivelon sur assemblage rivé** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 141 : **Rivet, constitution d'un assemblage**
- Fig. 142 : **Assemblage rivé** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 143 : **Caractéristiques géométriques d'un rivet : A diamètre du rivet, B diamètre de la tête, C hauteur de la tête**
- Fig. 144 : **Principe du rivetage** (photo Jean-Paul Persy)
- Fig. 145 : **Différents modes d'assemblage** (document JP Gourmelon)
- Fig. 146 : **Principe de fonctionnement** (document JP Gourmelon)
- Fig. 147 : **Assemblages sollicités perpendiculairement à l'axe des rivets** (bibliographie [6])
- Fig. 148 : **Assemblages sollicités parallèlement à l'axe des rivets** (bibliographie [15])
- Fig. 149 : **Distance des rivets**
- Fig. 150 : **Coupe d'une tête de rivet** (photos Eiffel)
- Fig. 151 : **Chasse du corps du rivet et alésage du trou au diamètre supérieur** (photos Eiffel)
- Fig. 152 : **Pose d'un rivet à tête ronde et gougeage de la tête de rivet** (photos Eiffel)

TABLEAUX

Tableau I :	Caractérisation chimique des procédés d'élaboration de l'acier (~1930)
Tableau II :	Production française d'acier selon le procédé d'élaboration
Tableau III :	Évolution de la nuance E 24 à la nuance E 36
Tableau IV :	Évolution de la nuance E 36 à la nuance E 460
Tableau V :	Évolution de la nuance S355 à la nuance S460
Tableau VI :	Synthèse des règlements de calcul – Contraintes admissibles (valeurs exprimées en kg/mm ²)
Tableau VII :	Caractéristiques des matériaux anciens (règlements 1891 et 1913)
Tableau VIII :	Éléments à doser
Tableau IX :	Corrosivité de l'atmosphère, selon la norme NF EN ISO 9226, pour l'acier au carbone
Tableau X :	Composition chimique – teneur en %
Tableau XI :	Géométrie de filetage – facteur de concentration de contrainte
Tableau XII :	Essais de résilience en Joules & ténacité
Tableau XIII :	Exemple de classement d'assemblages – extrait Eurocode 3 chapitre 9
Tableau XIV :	Classification des soudures et des assemblages soudés suivant l'eurocode 3
Tableau XV :	Classes de conséquences selon NF EN 1090-2
Tableau XVI :	Catégories d'exécution selon NF EN 1090-2
Tableau XVII :	Classe d'exécution selon NF EN 1090-2
Tableau XVIII :	Catégorie d'assemblages boulonnés (seule la catégorie C est admise pour les éléments structuraux de ponts) (SETRA)
Tableau XIX :	Caractéristiques chimiques et mécaniques des boulons HR (fasc. 4 titre IV)
Tableau XX :	Boulons ordinaires et boulons à haute résistance : résistance à la traction Rm et limite d'élasticité Rp (valeurs nominales)
Tableau XXI :	Classifications pouvant être envisagées pour les surfaces de frottement (NF EN 1090-2 – 8-4)
Tableau XXII :	Caractéristiques des matériaux – Règlement de 1891
Tableau XXIII :	Caractéristiques des matériaux – Règlement de 1913
Tableau XXIV :	Caractères chimiques et mécaniques des matériaux – Fasc. 4 titre IV sept. 67
Tableau XXV :	Diamètre des rivets et barres et tolérances – Fasc. 4 titre IV sept. 67
Tableau XXVI :	Caractères géométriques des rivets – Fasc. 4 titre IV sept. 67
Tableau XXVII :	Caractères mécaniques des rivets – Fasc. 4 titre IV sept. 67
Tableau XXVIII :	Caractères géométriques des rivets – NFE 27-156 sept. 83
Tableau XXIX :	Caractères mécaniques des rivets – NFE 27-156 sept. 83

Annexe 1

Documents de référence

■ RÈGLEMENTS

Secrétariat d'État aux Travaux Publics, aux Transports et au Tourisme - **Cahier des charges général pour les travaux dépendant de l'administration des Ponts et Chaussées.**

Circulaire n° 33 du 8 avril 1958.

Circulaire n° 91 du 7 décembre 1959 et annexes - **Cahier des prescriptions communes applicable aux travaux de l'administration des ponts et chaussées** : fascicule 1, **dispositions générales** - Fascicule spécial n° 60-20 bis du BTO travaux publics et transports.

Circulaire ministérielle n° 84 du 25 novembre 1962 relative au fascicule n° 4, titre III du cahier des prescriptions communes applicables aux travaux relevant des services des ponts et chaussées (**aciers laminés pour constructions métalliques**).

Circulaire n° 66 du 4 octobre 1966 relative au fascicule n° 4, titre III du cahier des prescriptions communes applicables aux travaux relevant des services des ponts et chaussées (**aciers laminés pour constructions métalliques**) et annexes.

Décret n° 65-798 du 7 septembre 1965 rendant obligatoires deux fascicules du cahier des prescriptions communes applicables aux marchés de travaux publics passés au nom de l'État - **Cahier des prescriptions communes applicable aux travaux relevant des services des ponts et chaussées** : fascicule 4, titre III **aciers laminés pour constructions métalliques** - Fascicule spécial n° 66-19 ter du BO du ministère de l'Équipement et du logement.

Circulaire n° 1 du 3 janvier 1966 accordant l'agrément à diverses qualités d'aciers soudables - Fascicule spécial n° 66-1 ter du BO du ministère de l'Équipement.

Circulaire n° 70-69 du 22 juillet 1970 relative à la vérification du contrôle en usine et Circulaire n° 71-86 du 11 août 1971 relative aux modalités de vérification du contrôle en usine des aciers soudables - Fascicule spécial n° 71-66 bis du BO du ministère de l'Équipement et du logement.

Circulaire n° 75-128 du 28 août 1975 relative au titre III **Aciers laminés pour constructions métalliques** du fascicule n° 4 du cahier des prescriptions communes applicables aux travaux relevant des services de l'équipement et annexes - Fascicule spécial n° 75-68 bis du BO du ministère de l'Équipement et du secrétariat d'État aux Transports.

Règlement technique d'agrément et de contrôle des aciers soudables approuvé le 12 janvier 1979.

Circulaire n° 58 du 14 septembre 1967 relative au titre IV **Rivets en acier - Boulons à haute résistance** du fascicule n° 4 **Fournitures d'aciers et autres métaux** du cahier des prescriptions communes applicables aux travaux relevant des services des ponts et chaussées et annexes - Fascicule spécial n° 67-17 quater du BO du ministère de l'Équipement et du logement.

Circulaire n° 78-115 du 6 septembre 1978 relative aux prescriptions techniques applicables aux marchés de travaux publics - Fascicule spécial n° 78-38 bis du BO du ministère de l'Environnement et du cadre de vie et du ministère des Transports.

Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés de travaux publics passés au nom de l'État - Fascicule n° 4 Aciers - titre IV **Rivets en acier - Boulonnerie à serrage contrôlé destinée à l'exécution des constructions métalliques** - Fascicule spécial n° 83-14 quinquies du BO Urbanisme et logement, Transports, Environnement et qualité de la vie.

Décret n° 2000-524 relatif à la composition du cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux.

Fascicule 66 du CCTG : **Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier** - (fascicule spécial n°96-6TO).

Fascicule 4 titre III du CCTG : **Fourniture d'acier et autres métaux - Aciers laminés pour construction métallique** (fascicule spécial n° 2000-2).

■ NORMES POUR ACIERS DE CONSTRUCTION

Norme NF A 35-501 : *Aciers de construction d'usage général - Nuances et qualités- Tôles minces, moyennes et fortes, larges-plats, laminés marchands et poutrelles* - Éditions de 1968, mai 1970, juillet 1973, mars 1977, mai 1979, octobre 1981, avril 1983 et avril 1987.

Normes - **Aciers** - Bulletin d'informations techniques, n° 46, 1994.

Norme NF A 36-201 : *Tôles en aciers soudables à haute limite d'élasticité - Nuances et qualités*, Août 1975.

Norme NF A 36-201 : *Tôles en aciers à haute limite d'élasticité pour constructions soudées - Nuances et qualités* - Éditions de mai 1979 et janvier 1984.

Norme NF A 35-502 : *Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique - Tôles minces, moyennes et fortes, larges-plats, laminés marchands et poutrelles*. Éditions de mai 1979 et novembre 1984.

Norme NF A 36-204 : *Tôles en aciers à haute limite d'élasticité livrées à l'état traité pour construction soudée - Nuances et qualités*. Éditions de décembre 1976 et avril 1983.

NF EN 10025 : *Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés - Conditions techniques de livraison*. Éditions d'octobre 1990 et décembre 1993.

NF EN 1 0113 : *Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grain fin* - Juin 1993.

Partie 1 : *Conditions générales de livraison*

Partie 2 : *Conditions de livraison des aciers à l'état normalisé / laminage normalisant*

Partie 3 : *Conditions de livraison des aciers obtenus par laminage thermomécanique*.

NF EN 10155 *Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique - Conditions techniques de livraison*, septembre 1993.

NF EN 10137-2 *Tôles et larges-plats en aciers de construction à haute limite d'élasticité à l'état trempé et revenu ou durci par précipitation* - Partie 2 : *Conditions de livraison des aciers à l'état trempé et revenu*, décembre 1995.

EN 10025-1 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 1 : Conditions générales de livraison*, mars 2005.

EN 10025-2 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 2 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés*, mars 2005.

EN 10025-3 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 3 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé/laminage normalisé*, mars 2005.

EN 10025-4 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 4 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins obtenus par laminage thermomécanique*, mars 2005.

EN 10025-5 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 5 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique*, mars 2005.

EN 10025-6 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 6 : Conditions techniques de livraison pour produits plats des aciers à haute limite d'élasticité à l'état trempé et revenu*, mars 2005.

■ NORMES POUR ACIERS MOULÉS

EN 1559-1 : *Fonderie - Conditions techniques de fourniture* - Partie 1 : *Généralités*.

EN 1559-2 : *Fonderie - Conditions techniques de fourniture* - Partie 2 : *Spécifications complémentaires pour les pièces moulées en acier*.

EN 10340 - 2007 : *Aciers moulés pour construction* (remplace les 2 normes précédentes).

■ RÉPARATION PAR SOUDAGE

EN 1993-1-8, eurocode 3 : **Calcul des structures en acier** - Partie 1-8 : **Calcul des assemblages**.

NF P 22-470 : **Assemblages soudés - Dispositions constructives** (remplacée par l'eurocode 3)

Fascicule 66 du CCTG : **Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier** – (fascicule spécial n°96-6TO).

NF P 22-471 : **Assemblages soudés – Fabrication** (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-472 : **Assemblages soudés – Qualification des modes opératoires** (remplacée par la NF EN ISO 15614-1).

NF P 22-473 : **Assemblages soudés – Etendue des contrôles non destructifs** (remplacée par l'EN 1090-2).

Fascicule de documentation P 22-474 : **Assemblages soudés – Guide de choix de la classe de qualité** (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-800 : **Préparation des pièces en atelier** (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-810 : **Ouvrages d'art – Tolérances dimensionnelles** (remplacée par l'EN 1090-2).

NF EN 1090-2 : **Exécution des structures en acier et des structures en aluminium** - Partie 2 : **Exigences techniques pour les structures en acier**.

Produits consommables pour soudage (selon NF EN 1090-2 : 2011.10)

EN 439 : **Produits consommables pour le soudage - Gaz de protection pour le soudage et le coupage à l'arc**.

EN 440 : **Produits consommables pour le soudage - Fils électrodes et dépôts pour le soudage à l'arc sous gaz des aciers non alliés et des aciers à grain fin – Classification**.

EN 756 : **Produits consommables pour le soudage - Fils pleins, couples fils pleins-flux et fils fourrés-flux pour le soudage à l'arc sous flux des aciers non alliés et à grains fins - Classification**

EN 757 : **Produits consommables pour le soudage - Électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers à haute résistance – Classification**.

EN 758 : **Produits consommables pour le soudage - Fils fourrés pour le soudage à l'arc avec ou sans protection gazeuse des aciers non alliés et à grains fins – Classification**.

EN 760 : **Produits consommables pour le soudage - Flux pour le soudage à l'arc sous flux – Classification**.

EN 1600 : **Produits consommables pour le soudage - Électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers inoxydables et résistant aux températures élevées – Classification**.

EN 1668 : **Produits consommables pour le soudage - Baguettes, fils d'apport et dépôts pour le soudage sous atmosphère inerte avec électrode réfractaire des aciers non alliés et des aciers à grains fins – Classification**.

EN 13479 : *Produits consommables pour le soudage - Norme produit générale pour les métaux d'apport et les flux pour le soudage par fusion de matériaux métalliques.*

EN 14295 : *Produits consommables pour le soudage - Fils-électrodes pleins et fils-électrodes fourrés et couples fils-flux pour le soudage sous flux des aciers à haute résistance - Classification.*

EN ISO 2560 : *Produits consommables pour le soudage - Électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers non alliés et des aciers à grain fin - Classification (ISO 2560 : 2002).*

EN ISO 13918 : *Soudage - Goujons et bagues en céramique pour le soudage à l'arc des goujons (ISO 13918: 1998)*

EN ISO 14343 : *Produits consommables pour le soudage - Fils-électrodes, fils d'apport et baguettes d'apport pour le soudage à l'arc des aciers inoxydables et des aciers résistant aux températures élevées -Classification (ISO 14343: 2002/Amd1 : 2006.)*

EN ISO 16834 : *Produits consommables pour le soudage - Fils-électrodes, fils, baguettes et dépôts pour le soudage à l'arc sous flux gazeux des aciers à haute résistance - Classification (ISO 16834 : 2006).*

EN ISO 17633 : *Produits consommables pour le soudage - Fils et baguettes fourrés pour le soudage à l'arc avec ou sans protection gazeuse des aciers inoxydables et des aciers résistant aux températures élevées -Classification (ISO 17633: 2004).*

EN ISO 1827 : *Produits consommables pour le soudage - Fils-électrodes fourrés pour le soudage à l'arc avec ou sans gaz de protection des aciers à haute résistance - Classification (ISO 18276 : 2005).*

Préparation (selon NF EN 1090-2)

EN ISO 9013 : *Coupage thermique - Classification des coupes thermiques - Spécification géométrique des produits et tolérances relatives à la qualité (ISO 9013 : 2002).*

ISO 286-2 : *Système ISO de tolérances et d'ajustements - Partie 2 : Tables des degrés de tolérance normalisés et des écarts limites des alésages et des arbres.*

CEN/TR 10347 : *Guidance for forming of structural steels in processing (Guide pour le formage des aciers de construction lors de leur mise en œuvre).*

Soudage (selon NF EN 1090-2)

EN 287-1 : *Épreuve de qualification des soudeurs - Soudage par fusion - Partie 1 : Aciers.*

EN 1011-1 - 1998 : *Soudage - Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques - Partie 1 : Lignes directrices générales pour le soudage à l'arc.*

EN 1011-2 - 2001 : *Soudage - Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques - Partie 2 : Soudage à l'arc des aciers ferritiques.*

EN 1011-3 : *Soudage - Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques - Partie 3 : Soudage à l'arc des aciers inoxydables.*

EN 1418 : *Personnel en soudage - Épreuve de qualification des opérateurs soudeurs pour le soudage par fusion et des régleurs en soudage par résistance pour le soudage totalement mécanisé et automatique des matériaux métalliques.*

EN ISO 3834 (toutes parties) : *Exigences de qualité en soudage par fusion des matériaux métalliques (ISO 3834 : 2005).*

EN ISO 4063 : *Soudage et techniques connexes - Nomenclature et numérotation des procédés (ISO 4063 : 1998)*

EN ISO 5817 : *Soudage - Assemblages en acier, nickel, titane et leurs alliages soudés par fusion (soudage par faisceau exclu) - Niveaux de qualité par rapport aux défauts (ISO 5817 : 2003, version corrigée: 2005, inclus corrigendum technique 1 : 2006).*

EN ISO 9692-1 : *Soudage et techniques connexes - Recommandations pour la préparation de joints – Partie 1 : soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée, soudage à l'arc avec électrode fusible sous protection gazeuse, soudage aux gaz, soudage TIG et soudage par faisceau des aciers (ISO 9692-1 : 2003).*

EN ISO 9692-2 : *Soudage et techniques connexes - Préparation de joints - Partie 2 : Soudage à l'arc sous flux en poudre des aciers (ISO 9692-2: 1998).*

EN ISO 13916 : *Soudage - Lignes directrices pour le mesurage de la température de préchauffage, de la température entre passes et de la température de maintien du préchauffage (ISO 13916: 1996).*

EN ISO 14373 : *Soudage par résistance - Mode opératoire pour le soudage par points des aciers à bas carbone revêtus et non revêtus (ISO 14373 : 2006).*

EN ISO 14554 (toutes parties) : *Exigences de qualité en soudage - Soudage par résistance des matériaux métalliques (ISO 14554 : 2000).*

EN ISO 14555 : *Soudage - Soudage à l'arc des goujons sur les matériaux métalliques (ISO 14555 : 2006).*

EN ISO 14731 : *Coordination en soudage - Tâches et responsabilités (ISO 14731: 2006).*

EN ISO 15609-1 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Descriptif d'un mode opératoire de soudage - Partie 1 : Soudage à l'arc (ISO 15609-1 : 2004).*

EN ISO 15609-4 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Descriptif d'un mode opératoire de soudage - Partie 4 : Soudage par faisceau laser (ISO 15609-4 : 2004).*

EN ISO 15609-5 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Descriptif d'un mode opératoire de soudage - Partie 5 : Soudage par résistance (ISO 15609-5 : 2004).*

EN ISO 15610 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Qualification basée sur des produits consommables soumis à essais (ISO 15610 - 2003).*

EN ISO 15611 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Qualification sur la base de l'expérience en soudage (ISO 15611 : 2003).*

EN ISO 15612 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Qualification par référence à un mode opératoire de soudage standard (ISO 15612 : 2004).*

EN ISO 15613 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Qualification sur la base d'un assemblage soudé de préproduction (ISO 15613 : 2004).*

EN ISO 15614-1 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage -Partie 1 : Soudage à l'arc et aux gaz des aciers et soudage à l'arc des nickels et alliages de nickel (ISO 15614-1: 2004).*

EN ISO 15614-11 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage - Partie 11 : soudage par faisceau d'électrons et par faisceau laser (ISO 15614-11: 2002).*

EN ISO 15614-13 : *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage - Partie 13 : soudage en bout par résistance pure et soudage par étincelage (ISO 15614 13 : 2005.)*

EN ISO 15620 : *Soudage - Soudage par friction des matériaux métalliques (ISO 15620 : 2000).*

EN ISO 16432 : *Soudage par résistance - Procédure pour le soudage par bossage(s) embouties des aciers à bas carbone revêtus et non revêtus (ISO 16432 : 2006).*

EN ISO 16433 : *Soudage par résistance - Mode opératoire pour le soudage à la molette des aciers à bas carbone revêtus et non revêtus (ISO 16433 : 2006).*

CEN ISO/TR 3834-6 : *Exigences de qualité en soudage par fusion des matériaux métalliques - Partie 6 : Lignes directrices pour la mise en application de l'ISO 3834 (ISO/TR 3834-6 : 2007).*

Tolérances (selon NF EN 1090-2)

EN ISO 13920 *Soudage - Tolérances générales relatives aux constructions soudées Dimensions des longueurs et angles - Formes et positions (ISO 13920 : 1996).*

■ RÉPARATION PAR BOULONNAGE

Circulaire n° 58 du 14 septembre 1967 relative au titre IV *Rivets en acier - Boulons à haute résistance* du fascicule n° 4 *Fournitures d'aciers et autres métaux* du cahier des prescriptions communes applicables aux travaux relevant des services des ponts et chaussées et annexes - Fascicule spécial n° 67-17 quater du BO du ministère de l'Équipement et du logement.

Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés de travaux publics passés au nom de l'État - Fascicule n° 4 *Aciers* titre IV *Rivets en acier - Boulonnerie à serrage contrôlé destinée à l'exécution des constructions métalliques* - Fascicule spécial n° 83-14 quinquies du BO Urbanisme et logement, Transports, Environnement et qualité de la vie.

Fascicule n° 61, titre V du CCTG : *Conception, calcul et épreuve des ouvrages d'art* – Décret n° 77-647 du 22 juin 1977.

NF EN 20898 : *caractéristiques mécaniques des éléments de fixation.*

NF E 27-701 *Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques - Spécifications techniques - Conditions de commande, de contrôle et de livraison,* (remplacée par NF EN 14399).

NF E 27-702 : *Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques - Essai d'aptitude à l'emploi des boulons* (remplacée par NF EN 14399).

NF E 27-711 : *Boulons à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques - Boulons à tête hexagonale - Dimensions et tolérances* (remplacée par NF EN 14399).

NF E 25-812 *Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte - Système HRC : Boulons à précontrainte calibrée* (avril 2004) – (sera remplacée par EN 14399-10).

NF EN 14399-1 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte*. Partie 1 : *Exigences générales*.

NF EN 14399-2 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte*. Partie 2 : *Essais d'aptitude à l'emploi pour la mise en précontrainte*.

NF EN 14399-3 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte*. Partie 3 : *Système HR - Boulons à tête hexagonale* (vis + écrou).

NF EN 14399-4 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte*. Partie 4 : *Système HV - Boulons à tête hexagonale* (vis + écrou).

NF EN 14399-5 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte*. Partie 5 : *Rondelles plates*.

NF EN 14399-6 : *Boulonnerie de construction métallique à haute résistance apte à la précontrainte*. Partie 6 : *Rondelles plates chanfreinées*.

prEN 14399-7 : *Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte* - Partie 7 : *Système HR - Boulons à tête fraisée* (vis + écrou).

prEN 14399-8 : *Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte* - Partie 8 : *Système HV - Boulons ajustés à tête hexagonale* (vis + écrou).

prEN 14399-9 : *Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte* - Partie 9 : *Système HR ou HV - Boulons avec rondelles indicatrices de précontrainte*.

prEN 14399-10 : *Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte* - Partie 10 : *Système HRC - Boulons (vis + écrou + rondelle) à précontrainte calibrée*.

EN 1993-1-8 eurocode 3 : *Calcul des structures en acier* - Partie 1-8 : *Calcul des assemblages*.

NF P 22-430 : *Assemblages par boulons non précontraints - Dispositions constructives et calcul des boulons* (remplacée par l'eurocode 3).

NF P 22-460 : *Assemblages par boulons à serrage contrôlé - Dispositions constructives et vérification des assemblages* (remplacée par l'eurocode 3).

Fascicule 66 du CCTG : *Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier* – (fascicule spécial n°96-6TO).

NF P 22-431 : *Assemblages par boulons non précontraints - Exécution des assemblages* (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-461 : *Assemblages par boulons à serrage contrôlé - Détermination du coefficient conventionnel de frottement* - (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-462 : *Assemblages par boulons à serrage contrôlé - Usinage et préparation des assemblages* - (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-463 : **Assemblages par boulons à serrage contrôlé – Exécution des assemblages** - (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-464 : **Assemblages par boulons à serrage contrôlé – Programme de pose des boulons** - (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-466 : **Assemblages par boulons à serrage contrôlé – Méthode de serrage et contrôle des boulons** - (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-468 : **Assemblages par boulons à serrage contrôlé – Serrage par rotation contrôlée de l'écrou – Détermination de l'angle de rotation** - (remplacée par l'EN 1090-2)

NF P 22-469 : **Assemblages par boulons à serrage contrôlé – Etalonnage des clés dynamométriques** - (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-800 : **Préparation des pièces en atelier** (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-810 : **Ouvrages d'art – Tolérances dimensionnelles** (remplacée par l'EN 1090-2).

NF EN 1090-2 : 2011.10 : **Exécution des structures en acier et des structures en aluminium** - Partie 2 : **Exigences techniques pour les structures en acier**.

EN 15048-1 : **Ensembles de boulonnerie de construction non précontraints** - Partie 1 : **Exigences générales**.

EN 20898-2 : **Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation** - Partie 2 : **Écrous avec charges d'épreuve spécifiées ; filetage à pas gros** (ISO 898-2: 1992).

EN ISO 898-1 : **Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier au carbone et en acier allié** - Partie 1 : **Vis et goujons** (ISO 898-1 : 1999).

■ RÉPARATION PAR RIVETAGE

Circulaire n° 58 du 14 septembre 1967 relative au titre IV Rivets en acier - **Boulons à haute résistance** du fascicule n° 4 **Fournitures d'aciers et autres métaux** du cahier des prescriptions communes applicables aux travaux relevant des services des ponts et chaussées et annexes - Fascicule spécial n° 67-17 quater du BO du ministère de l'Équipement et du logement.

Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés de travaux publics passés au nom de l'État - Fascicule n° 4 **Aciers** titre IV **Rivets en aciers - Boulonnerie à serrage contrôlé destinée à l'exécution des constructions métalliques** - Fascicule spécial n° 83-14 quinquès du BO Urbanisme et logement, Transports, Environnement et qualité de la vie.

Fascicule n° 61, titre V du CCTG **Conception, calcul et épreuve des ouvrages d'art** – Décret n° 77-647 du 22 juin 1977.

NF EN 20898 **caractéristiques mécaniques des éléments de fixation**.

EN 1993-1-8, eurocode 3 **Calcul des structures en acier** - Partie 1-8 : **Calcul des assemblages**

NF P 22-410 **Assemblages rivés - dispositions constructives et calculs des rivets** (remplacé par eurocode 3).

Fascicule 66 du CCTG : **Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier** – (fascicule spécial n°96-6TO).

NF P 22-411 : **Assemblages rivés - exécution des assemblages**, (remplacée par EN 1090-2).

NF P 22-800 : **Préparation des pièces en atelier** (remplacée par l'EN 1090-2).

NF P 22-810 : **Ouvrages d'art – Tolérances dimensionnelles** (sera remplacée par l'EN 1090-2).

NF EN 1090-2 : 2011.10 : **Exécution des structures en acier et des structures en aluminium** - Partie 2 : **Exigences techniques pour les structures en acier**.

EN ISO 15976 : **Rivets aveugles à rupture de tige à corps fermé, à tête bombée** – St/St (ISO 15976 : 2002).

EN ISO 15979 : **Rivets aveugles à rupture de tige à corps ouvert, à tête bombée** – St/St (ISO 15979 : 2002).

EN ISO 15980 : **Rivets aveugles à rupture de tige à corps ouvert, à tête fraisée** – St/St (ISO 15980 : 2002).

EN ISO 15983 : **Rivets aveugles à rupture de tige à corps ouvert, à tête bombée** – A2/A2 (ISO 15983 : 2002).

EN ISO 15984 : **Rivets aveugles à rupture de tige à corps ouvert à tête fraisée** – A2/A2 (ISO 15984 : 2002).

Annexe 2

Tableau simplifié des nuances
et qualités d'acier, règlements et normes
appliqués en France dans le cadre de la construction
des ouvrages d'art

Tableau simplifié des nuances et qualités d'acier, des règlements et normes appliquées en France								
	2004	1990	1976	1966	1962	1956	1933	
Règlement	Fasc 4 titre III					Cahier des charges général	circulaire du 7/02/33	
date	depuis 1976			1966 jusqu'à 75	1962	1956	1933	
Normes	EN 10025-2	EN 10025 + A1	NF A 35-501	NF A 35-501				
date et révisions	2004 S185	1990 - 1993 S185	1981 - 83 - 87	1970 - 73 - 74 - 77 (A 33)				
Aciers de construction non alliés	S235JR S235J0 S235J2	S235JR S235JRG2 S235J0 S235JRG3 S235JRG4		E 24-1 (A 37) E 24-2 E 24-3 E 24-4				
				E 26-1 E 26-2 E 26-3 E 26-4	A 42 CR A 42 S 21 A 42 S 31 A 42 S 41	A 42 CR A 42 S 2 A 42 S 3 A 42 S 4	Ac 42	
	S275JR S275J0 S275J2	S275JR S275J0 S275J2G3 S275J2G4	E 28-2 E 28-3 E 28-4					
				E 30 (A 47)				
	S355JR S355J0 S355J2 S355K2	S355JR S355J0 S355J2G4 S355K2G3 S355K2G4	E 36-2 E 36-3 E 36-4	E 36-1 E 36-2 E 36-3 E 36-4 *	A 52 CR A 52 S α A 52 S α A 52 S γ			
							Ac 54	
* E 36 A et B avant la parution de la NF A 36-201								

Tableau simplifié des nuances et qualités d'acier, des règlements et normes appliquées en France (suite)							
	2004	1990	1976	1966	1962	1956	1933
Règlement	Fasc 4 titre III					Cahier des charges général	circulaire du 7/02/33
date	depuis 1976			1966 jusqu'à 75	1962	1956	1933
Normes	EN 10025-3	EN 10113-2	NF A 36-201				
date et révisions	2004	1993	1972 - 74 - 79 - 84				
aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé / laminage normalisant	S275N S275NL	S275N S275NL					
	S355N S355NL	S355N S355NL	E 355 R E 355 FP				R résilience à -20°C FP résilience à -50°C
			E 375 R E 375 FP				
	S420N S420NL	S420N S420NL	E 420 R E 420 FP				
	S460N S460NL	S460N S460NL	E 460 R E 460 FP				
Normes	EN 10025-4	EN 10113-3					
date et révisions	2004	1993					
aciers de construction soudables à grains fins à l'état obtenu par laminage thermomécanique	S275M S275ML	S275M S275ML					
	S355M S355ML	S355M S355ML					
	S420M S420ML	S420M S420ML					
	S460M S460ML	S460M S460ML					
Normes	EN 10025-5	EN 10155	NF A 35-502				
date et révisions	2004	1993	1979 - 1984				
aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique	S235J0W S235J2W	S235J0W S235J2W	E 24 W 2 E 24 W 3 E 24 W 4				
	S355J0WP S355J2WP	S355J0WP S355J2WP	E 36 W A 2 E 36 W A 3 E 36 W A 4				
	S355J0W S355J2W	S355J0W S355J2G2W S355K2G1W S355K2G2W	E 36 W B 2 E 36 W B 3 E 36 W B 4				

Annexe 3

Règlements de calcul

LISTE DES REGLEMENTS DE CALCUL SELON L'ARTICLE DE JACQUES ROCHE ET JOËL RAOUL (SETRA) PARU DANS LA REVUE DE L'OTUA PONTS METALLIQUES N° 20 (BIBLIOGRAPHIE [2])

- Règlement du 26 février 1858 pour les ponts rails.
- Règlement du 15 juin 1869
- Règlement du 7 mai 1870
- Règlement du 9 juillet 1877
- Règlement du 27 décembre 1886
- Règlement du 29 août 1891
- Règlement du 8 janvier 1915
- Règlement du 10 mai 1927
- Le fascicule 61, titres I à V, du 19 août 1960
- Les prescriptions du 25 mars 1966 pour les ponts-routes mixtes
- Le fascicule 61, titre V, du 4 février 1970
- Le fascicule 61, titre V, du 4 juillet 1972
- L'instruction du 21 juillet 1981 sur le calcul des ponts mixtes
- Les eurocodes

Annexe 4

Sommaire NF EN 1090-2 : 2011.10

EXÉCUTION DES STRUCTURES EN ACIER ET DES STRUCTURES EN ALUMINIUM

Partie 2 : Exigences techniques pour les structures en acier.

Avant-propos	9
Introduction	10
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives	10
2.1 Généralités	10
2.2 Produits constitutifs	11
2.2.1 Aciers	11
2.2.2 Aciers moulés	13
2.2.3 Produits consommables pour soudage	13
2.2.4 Fixations mécaniques	14
2.2.5 Câbles à haute résistance	16
2.2.6 Appareils d'appui structuraux	16
2.3 Préparation	16
2.4 Soudage	16
2.5 Essais	18
2.6 Montage	19
2.7 Protection contre la corrosion	19
2.8 Tolérances	20
2.9 Divers	20
3 Termes et définitions	20
4 Cahiers des charges et dossier	22
4.1 Cahier des charges d'exécution	22
4.1.1 Généralités	22
4.1.2 Classes d'exécution	23
4.1.3 Degrés de préparation	23
4.1.4 Tolérances géométriques	23
4.2 Dossier du constructeur	23
4.2.1 Dossier qualité	23
4.2.2 Plan qualité	24
4.2.3 Sécurité des travaux de montage	24
4.2.4 Dossier d'exécution	24
5 Produits constitutifs	24
5.1 Généralités	24
5.2 Identification, documents de contrôle et traçabilité	24

5.3 Aciers de construction	25
5.3.1 Généralités	25
5.3.2 Tolérances d'épaisseur	27
5.3.3 Etats de surface	27
5.3.4 Caractéristiques particulières	27
5.4 Aciers moulés	28
5.5 Produits consommables pour le soudage	28
5.6 Éléments de fixation mécaniques	29
5.6.1 Généralités	29
5.6.2 Terminologie	29
5.6.3 Boulons de construction destinés à des applications non précontraintes ...	29
5.6.4 Boulons de construction aptes à la précontrainte	30
5.6.5 Indicateurs directs de précontrainte	30
5.6.6 Boulons résistant à la corrosion atmosphérique	30
5.6.7 Boulons d'ancrage	31
5.6.8 Dispositifs de blocage	31
5.6.9 Rondelles	31
5.6.10 Rivets à chaud	31
5.6.11 Éléments de fixation pour éléments minces	31
5.6.12 Éléments de fixation particuliers	31
5.6.13 Livraison et identification	31
5.7 Goujons et connecteurs de cisaillement	32
5.8 Matériaux de scellement	32
5.9 Joints de dilatation pour ponts	32
5.10 Câbles à haute résistance, tirants et terminaisons	33
5.11 Appareils d'appui structuraux	33
6 Préparation et assemblage	33
6.1 Généralités	33
6.2 Identification	33
6.3 Manutention et stockage	34
6.4 Coupage	35
6.4.1 Généralités	35
6.4.2 Cisailage et grignotage	35
6.4.3 Coupage thermique	35
6.4.4 Dureté de surface des chants	36
6.5 Formage	37
6.5.1 Généralités	37
6.5.2 Formage à chaud	37
6.5.3 Chaudes de retrait	37
6.5.4 Formage à froid	38
6.6 Perçage	39
6.6.1 Dimensions des trous	39
6.6.2 Tolérances sur le diamètre de trou pour les boulons et les axes d'articulation	40
6.6.3 Exécution du perçage	40

6.7 Découpes.....	41
6.8 Surfaces d'appui par contact direct	41
6.9 Assemblage.....	42
6.10 Essai de présentation.....	42
7 Soudage.....	42
7.1 Généralités.....	42
7.2 Programme de soudage	43
7.2.1 Exigences relatives à un programme de soudage.....	43
7.2.2 Contenu d'un programme de soudage	43
7.3 Procédés de soudage.....	43
7.4 Qualification des modes opératoires de soudage et du personnel en soudage	44
7.4.1 Qualification des modes opératoires de soudage	44
7.4.2 Soudeurs et opérateurs soudeurs.....	46
7.4.3 Coordination en soudage	46
7.5 Préparation et exécution du soudage.....	48
7.5.1 Préparation des joints	48
7.5.2 Stockage et manutention des produits consommables pour le soudage	48
7.5.3 Protection contre les intempéries	49
7.5.4 Assemblage en vue du soudage.....	49
7.5.5 Préchauffage	50
7.5.6 Fixations provisoires	50
7.5.7 Soudures de pointage	50
7.5.8 Soudures d'angle.....	50
7.5.9 Soudures bout à bout.....	51
7.5.10 Soudures sur aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique...	51
7.5.11 Nœuds	52
7.5.12 Soudage des goujons	52
7.5.13 Soudures en entaille et en bouchon.....	52
7.5.14 Soudures par points des éléments minces	52
7.5.15 Autres types de soudures	53
7.5.16 Traitement thermique après soudage	53
7.5.17 Exécution du soudage.....	53
7.5.18 Soudage des tabliers de ponts.....	53
7.6 Critères d'acceptation	53
7.7 Soudage des aciers inoxydables	55
7.7.1 Modifications apportées aux exigences de l'EN 1011-1	55
7.7.2 Modifications apportées aux exigences de l'EN 1011-3	55
7.7.3 Soudage d'aciers différents.....	56
8 Fixations mécaniques	56
8.1 Généralités.....	56
8.2 Utilisation des boulons.....	56
8.2.1 Généralités.....	56
8.2.2 Vis	57
8.2.3 Écrous.....	57
8.2.4 Rondelles	57
8.3 Serrage des boulons non précontraints	58

8.4 Préparation des surfaces de contact dans les assemblages résistant au glissement	58
8.5 Serrage des boulons précontraints	59
8.5.1 Généralités	59
8.5.2 Valeur de référence du couple	61
8.5.3 Méthode du couple	61
8.5.4 Méthode combinée	61
8.5.5 Méthode HRC	62
8.5.6 Méthode par indicateur direct de précontrainte	62
8.6 Boulons ajustés	63
8.7 Rivetage à chaud	63
8.7.1 Rivets	63
8.7.2 Mise en œuvre des rivets	63
8.7.3 Critères d'acceptation	64
8.8 Fixation des éléments minces	64
8.8.1 Généralités	64
8.8.2 Utilisation de vis autotaraudeuses et autoperceuses	64
8.8.3 Utilisation de rivets aveugles	65
8.8.4 Fixation aux recouvrements	65
8.9 Utilisation d'éléments de fixation particuliers et de méthodes de fixation particulières	65
8.10 Grippage et arrachement superficiel des aciers inoxydables	66
9 Montage	66
9.1 Généralités	66
9.2 Conditions de chantier	66
9.3 Méthode de montage	67
9.3.1 Méthode de montage servant de base au projet	67
9.3.2 Méthode de montage du constructeur	68
9.4 Levé	68
9.4.1 Système de référence	68
9.4.2 Points de repère	69
9.5 Appuis, ancrages et appareils d'appui	69
9.5.1 Contrôle des appuis	69
9.5.2 Implantation et adéquation des appuis	69
9.5.3 Maintien de l'adéquation des appuis	69
9.5.4 Calages provisoires	69
9.5.5 Scellement et remplissage	70
9.5.6 Ancrage	71
9.6 Montage et travaux sur site	71
9.6.1 Plans de montage	71
9.6.2 Marquage	72
9.6.3 Manutention et stockage sur chantier	72
9.6.4 Montage à blanc	72
9.6.5 Méthodes de montage	72
10 Traitement de surface	74
10.1 Généralités	74
10.2 Préparation des subjectiles d'acier pour peintures et produits assimilés	74
10.3 Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique	75

10.4	Compatibilité galvanique.....	75
10.5	Galvanisation	75
10.6	Étanchéité des espaces clos	76
10.7	Surfaces en contact avec du béton	76
10.8	Surfaces inaccessibles	76
10.9	Réparations après coupage ou soudage.....	76
10.10	Nettoyage après montage.....	77
	10.10.1 Nettoyage des éléments minces	77
	10.10.2 Nettoyage des éléments en aciers inoxydables.....	77
11	Tolérances géométriques	77
11.1	Types de tolérances	77
11.2	Tolérances essentielles.....	78
	11.2.1 Généralités.....	78
	11.2.2 Tolérances de fabrication.....	78
	11.2.3 Tolérances de montage	78
11.3	Tolérances fonctionnelles	80
	11.3.1 Généralités.....	80
	11.3.2 Valeurs tabulées.....	80
	11.3.3 Critères alternatifs	80
12	Contrôles, essais et réparations	80
12.1	Généralités	80
12.2	Produits constitutifs et éléments.....	80
	12.2.1 Produits constitutifs.....	80
	12.2.2 Éléments.....	81
	12.2.3 Produits non conformes	81
12.3	Fabrication : dimensions géométriques des éléments fabriqués	81
12.4	Soudage	82
	12.4.1 Contrôles avant et pendant le soudage	82
	12.4.2 Contrôle après soudage	82
	12.4.3 Contrôle et essais des goujons connecteurs soudés pour les structures mixtes acier béton.....	85
	12.4.4 Essais de production relatifs au soudage.....	85
12.5	Fixations mécaniques	86
	12.5.1 Contrôle des assemblages boulonnés non précontraints.....	86
	12.5.2 Contrôle et essais des assemblages boulonnés précontraints	86
	12.5.3 Contrôles, essais et réparations des rivets à chaud.....	89
	12.5.4 Contrôle de la fixation des éléments et plaques formés à froid.....	89
	12.5.5 Éléments de fixation particuliers et méthodes de fixation particulières.....	90
12.6	Traitement de surface et protection contre la corrosion	90
12.7	Montage	90
	12.7.1 Contrôle du montage à blanc	90
	12.7.2 Contrôle de la structure montée.....	90
	12.7.3 Levé de la position géométrique des nœuds d'assemblage	90
	12.7.4 Autres essais d'acceptation	92

Annexe A (normative) Informations supplémentaires, liste des options et exigences relatives aux classes d'exécution	93
A.1 Liste des Informations supplémentaires requises.....	93
A.2 Liste d'options.....	96
A.3 Exigences relatives aux classes d'exécution.....	100
Annexe B (informative) Guide pour la détermination des classes d'exécution	105
B.1 Introduction	105
B.2 Facteurs déterminants pour le choix d'une classe d'exécution.....	105
B.2.1 Classes de conséquences.....	105
B.2.2 Risques liés à l'exécution et à l'exploitation de la structure	105
B.3 Détermination des classes d'exécution.....	106
Annexe C (informative) Liste de contrôle du contenu d'un plan qualité	108
C.1 Introduction	108
C.2 Contenu	108
C.2.1 Gestion	108
C.2.2 Revue des spécifications.....	108
C.2.3 Documentation	108
C.2.4 Procédures de contrôles et d'essais.....	109
Annexe D (normative) Tolérances géométriques	110
D.1 Tolérances essentielles.....	110
D.1.1 Tolérances essentielles de fabrication - Profilés soudés	110
D.1.2 Tolérances essentielles de fabrication - Profilés formés à froid à la presse....	112
D.1.3 Tolérances essentielles de fabrication - Semelles de profilés soudés	113
D.1.4 Tolérances essentielles de fabrication - Semelles de caissons soudés	114
D.1.5 Tolérances essentielles de fabrication - Raidisseurs d'âme de profilés ou de caissons soudés.....	115
D.1.6 Tolérances essentielles de fabrication - Plaques raidies	116
D.1.7 Tolérances essentielles de fabrication - Tôles profilées formées à froid ...	117
D.1.8 Tolérances essentielles de fabrication - Trous de fixation, grugeages et chants de coupe.....	118
D.1.9 Tolérances essentielles de fabrication - Coques cylindriques et coniques .	118
D.1.10 Tolérances essentielles de fabrication - Éléments de treillis.....	120
D.1.11 Tolérances essentielles de montage - Poteaux de structures à un seul niveau	121
D.1.12 Tolérances essentielles de montage - Poteaux de structures à plusieurs niveaux	122
D.1.13 Tolérances essentielles de montage - Appuis par contact direct.....	123
D.1.14 Tolérances essentielles de montage - Tours et mâts	123
D.1.15 Tolérances essentielles de montage - Poutres en flexion et éléments en compression	124
D.2 Tolérances fonctionnelles.....	124
D.2.1 Tolérances essentielles de fabrication - Profilés soudés	126
D.2.2 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Profilés formés à froid à la presse.....	126
D.2.3 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Semelles de profilés soudés	127
D.2.4 Tolérances fonctionnelles de fabrication -Caissons soudés	128

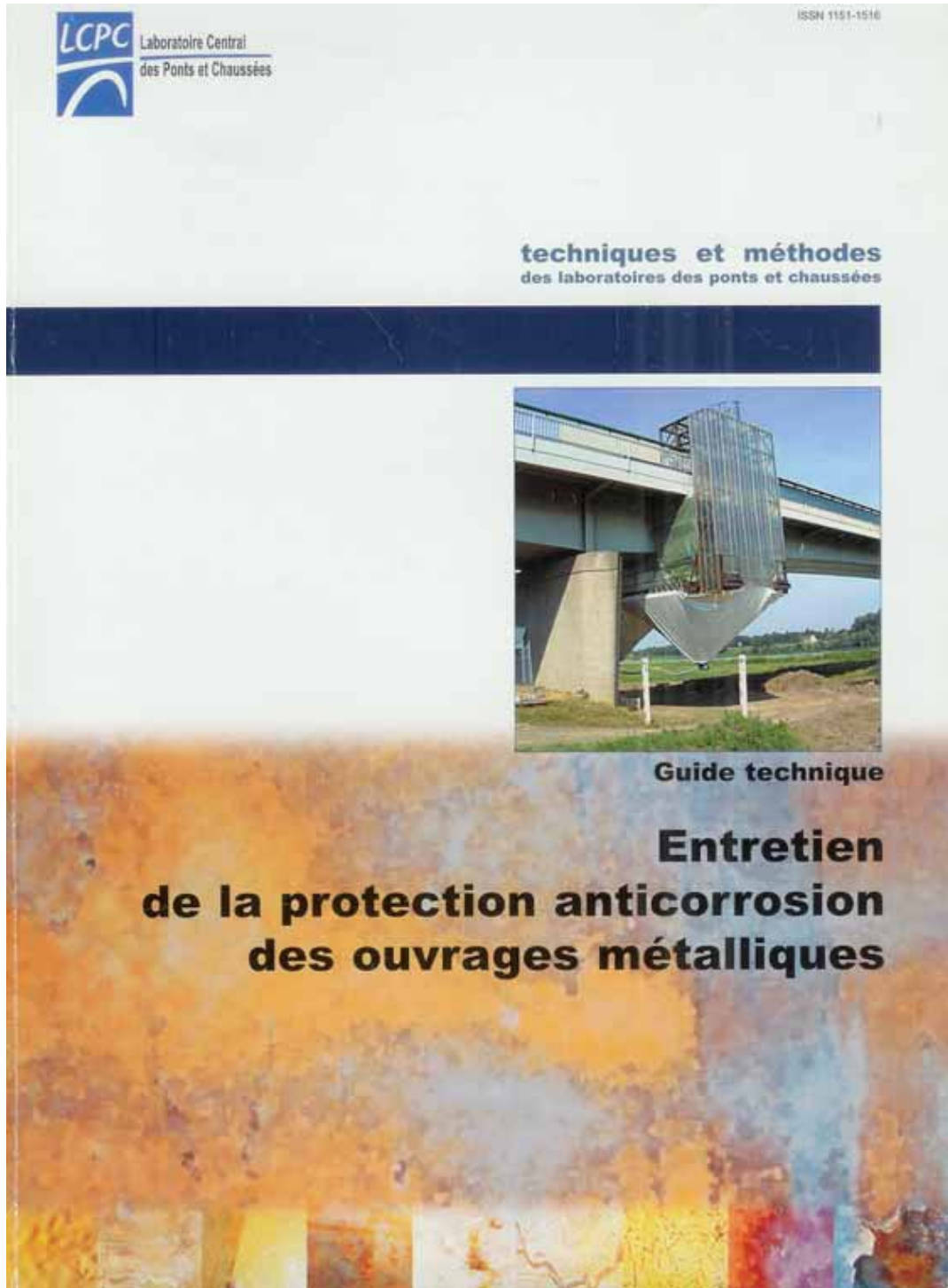
D.2.5 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Ames de profilés ou de caissons soudés	129
D.2.6 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Raidisseurs d'âme de profilés ou sections de caissons soudés	131
D.2.7 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Éléments	132
D.2.8 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Trous de fixation, grugeages et chants de coupe	133
D.2.9 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Éclissages de poteaux et plaques d'assise	135
D.2.10 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Éléments en treillis	135
D.2.11 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Plaques raidies	137
D.2.12 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Tours et mâts	138
D.2.13 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Tôles profilées formées à froid	139
D.2.14 Tolérances fonctionnelles de fabrication - Tabliers de ponts	140
D.2.15 Tolérances fonctionnelles de montage - Ponts	141
D.2.16 Tolérances fonctionnelles de montage - Tabliers de ponts (feuille 1/3)..	142
D.2.17 Tolérances fonctionnelles de montage - Tabliers de ponts (feuille 2/3)..	144
D.2.18 Tolérances fonctionnelles de montage - Tabliers de ponts (feuille 3/3)..	146
D.2.19 Tolérances fonctionnelles de fabrication et de montage-Chemins de roulement et rails	147
D.2.20 Tolérances fonctionnelles - Fondations et appuis de béton	148
D.2.21 Tolérances fonctionnelles de montage - Chemins de roulement des ponts roulants	149
D.2.22 Tolérances fonctionnelles de montage - Positions des poteaux	151
D.2.23 Tolérances fonctionnelles de montage - Poteaux de bâtiment à un seul niveau	152
D.2.24 Tolérances fonctionnelles de montage-Poteaux dans une structure à plusieurs niveaux.	153
D.2.25 Tolérances fonctionnelles de montage - Bâtiments	154
D.2.26 Tolérances fonctionnelles de montage - Poutres de bâtiments	155
D.2.27 Tolérances fonctionnelles de montage - Tôle de toiture pour collaboration des parois	157
D.2.28 Tolérances fonctionnelles de montage - Couverture en tôles d'acier profilées	157
Annexe E (informative) Assemblages soudés de profils creux	158
E.1 Généralités	158
E.2 Guide pour les positions de départ et d'arrêt	158
E.3 Préparation des bords à souder	158
E.4 Assemblage en vue du soudage	159
E.5 Assemblages par soudure d'angle	165
Annexe F (normative) Protection contre la corrosion	166
F.1 Généralités	166
F.1.1 Domaine d'application	166
F.1.2 Prescription de performance	166
F.1.3 Exigences	166
F.1.4 Méthode de travail	167

F.2 Préparation de surface des aciers au carbone.....	167
F.2.1 Préparation de surface des aciers au carbone avant peinture et métallisation	167
F.2.2 Préparation de surface des aciers au carbone avant galvanisation.....	168
F.3 Soudures et surfaces à souder.....	168
F.4 Surfaces des assemblages précontraints.....	168
F.5 Préparation des éléments de fixation.....	168
F.6 Méthodes de revêtement	169
F.6.1 Peinture	169
F.6.2 Métallisation	169
F.6.3 Galvanisation	169
F.7 Contrôles et vérifications.....	170
F.7.1 Généralités	170
F.7.2 Vérification de routine.....	170
F.7.3 Surfaces de référence	170
F.7.4 Éléments galvanisés	170
Annexe G (normative) Essai pour déterminer le coefficient de frottement.....	171
G.1 Généralités.....	171
G.2 Variables significatives.....	171
G.3 Éprouvettes d'essai.....	171
G.4 Mode opératoire de l'essai de glissement et évaluation des résultats	172
G.5 Mode opératoire et évaluation de l'essai de fluage prolongé	173
G.6 Résultats d'essai	174
Annexe H (normative) Essai d'étalonnage pour boulons précontraints en condition de chantier.....	175
H.1 Domaine d'application	175
H.2 Symboles et unités	175
H.3 Principe de l'essai.....	176
H.4 Appareillage d'essai	176
H.5 Ensemble pour essais	176
H.6 Montage d'essai.....	176
H.7 Mode opératoire d'essai.....	177
H.8 Évaluation des résultats d'essai	178
H.9 Rapport d'essais	179
Annexe J (normative) Utilisation d'indicateurs directs de précontrainte de type rondelles compressibles	180
J.1 Généralités	180
J.2 Installation	180
J.3 Vérification	182
Annexe K (informative) Boulons hexagonaux injectés	184
K.1 Généralités.....	184
K.2 Dimensions des trous	184
K.3 Vis	184

K.4 Rondelles	185
K.5 Écrous	186
K.6 Résine	186
K.7 Serrage	186
K.8 Mise en œuvre.....	186
Annexe L (informative) Guide pour l'organigramme de mise au point et d'utilisation d'un DMOS.....	187
Annexe M (normative) Méthode séquentielle de contrôle des éléments de fixation.....	188
M.1 Généralités	188
M.2 Application.....	189
Bibliographie	190

Annexe 5

Sommaire du guide technique LCPC entretien de la protection anticorrosion des ouvrages métalliques



SOMMAIRE

Préambule	5
A. Visite de reconnaissance de la protection d'un ouvrage	7
A1. Démarches préalables à la visite	9
A2. Visite proprement dite	9
A21. Détermination de la nature des systèmes de protection en place	9
A22. Qualification de l'état et de la qualité des protections en place	11
A23. Évaluation de l'étendue et de la répartition des dégradations	15
A3. Détermination de la corrosivité d'un site	17
A4. le compte rendu de visite. Premières orientations vers l'entretien et l'essai préalable de décapage	18
B. L'essai préalable de décapage	19
B1. Objectifs de l'essai préalable de décapage	21
B2. Opérations préalables à la programmation de l'essai	21
B3. Exécution de l'essai	21
B31. Décapage complet	22
B32. Avivage	22
B4. Gestion des déchets	23
B41. Contexte législatif et réglementaire	24
B42. Traitement des résidus de décapage	27
B5. Contenu du rapport	27
C. Choix de la technique d'entretien	29
C1. Préambule	31
C2. Choix de la technique de préparation de surface	31
C3. Choix du système de protection	33
C31. Principes	33
C32. Remise en peinture d'un ouvrage peint	33
C33. Remise en peinture d'une galvanisation peinte ou non peinte ou d'une métallisation peinte	34
C4. Conseils généraux	34
C5. Quelques éléments de coûts	35
D. Techniques de suivi d'un chantier	37
D1. La préparation des surfaces	39
D 11. Domaine d'application	39
D 12. Les différents types de travaux	39
D 13. Organisation de la préparation des surfaces	39
D 14. Nettoyage des surfaces avant décapage	39
D 15. Décapage	40
D 16. Dépoussiérage après décapage	41
D17. Aptitude de la surface à recevoir un revêtement	41
D2. L'application des produits	46
D21. Contrôle des produits	46
D22. Préparation des produits	47
D23. Application des systèmes de peinture	47

E. Contrôle de réception du système complet appliqué	51
E1. Contrôle des épaisseurs sèches	53
E 11. Support en acier ou acier métallisé	53
E 12. Support en acier galvanisé	53
E2. Contrôle de l'adhérence	54
E21. Essai de quadrillage NF EN ISO 2409	54
E22. Essai d'adhérence par traction NF EN ISO 4624	54
E3. Contrôle de la porosité ASTM D 5162	55
E4. Contrôle de la couleur et de l'aspect	55
E41. Contrôle de la couleur NF T 34-554	55
E42. Contrôle de l'aspect	56
Bibliographie	57
Annexe : Prélèvement et évaluation de la salinité globale sur une surface	61

PREAMBULE

Ce guide est un guide technique à l'attention des ingénieurs et techniciens ayant en charge la protection anticorrosion d'un ouvrage métallique par peintures.

Il vient expliquer, développer et approfondir certaines dispositions du chapitre 4 du fascicule 56 du CCTG (arrêté du 12 février 2004) qui traite de cet entretien.

Ainsi, l'article 4.4 de ce fascicule impose au marché de préciser la « consistance des travaux » et notamment le type de préparation de surface (« primaire » ou « secondaire ») ainsi que le type de système de peinture « pour travaux neufs ou pour travaux de maintenance ». Pour déterminer cette consistance des travaux, le fascicule renvoie à son annexe 4, non contractuelle, traitant de deux opérations préalables :

- la visite de reconnaissance de l'ouvrage et de la protection en place,
- l'essai préalable de décapage.

Les deux premiers chapitres de ce guide développent ces deux opérations préalables qui servent de support au choix de la technique d'entretien (la « consistance des travaux »), objet du troisième chapitre du guide.

Ensuite et une fois le chantier lancé, le chapitre 4 développe les techniques de suivi : suivi de la préparation de surface et suivi de l'application des produits.

Enfin le dernier chapitre fait le point des méthodes utilisables pour évaluer la conformité de la protection mise en place à celle spécifiée. Ces méthodes peuvent faire l'objet de normes précises (épaisseurs, couleur) ou en cours de développement (adhérence, porosité). Elles peuvent, également, ne pas faire l'objet de norme comme la détection des défauts du feuillet mettant en cause la durabilité.

Les deux derniers chapitres s'adressent particulièrement aux agents chargés des contrôles qu'ils s'agissent de ceux du contrôle intérieur comme de ceux du contrôle extérieur.

Il faut remarquer que si les trois premiers chapitres sont spécifiques à l'entretien de la protection des ouvrages existants, les deux derniers sont également applicables à la protection des ouvrages neufs.



Le comité de pilotage du guide révisé « Réparation et rénovation des structures métalliques » [FAME – version 3] était composé de :

Christian TRIDON , président du STRRES	
Bernard FARGEOT , président d'honneur du STRRES	
Hubert LABONNE , vice-président d'honneur du STRRES	
Gérard COLLE , vice-président d'honneur du STRRES	
Jean-Pierre GADRET , vice-président d'honneur du STRRES	
Gil CHARTIER	RCA
Philippe ARVILLE	EIFFEL
Christophe JANSSEN	LASSARAT
Jean-Hugues AUTISSIER	BAUDIN-CHATEAUNEUF
Joël DUMONT	BAUDIN-CHATEAUNEUF
Xavier JULLIAN	SOLETANCHE BACHY
Christian TOURNEUR	FREYSSINET

Le guide FAME – version 3 a été rédigé par : **Jean-Paul PERSY**
avec l'expertise de :

Yves PICARD	
Bernard PLU	SNCF
Jean-Michel VIGO	OTUA
Daniel POINEAU	
Michel FRAGNET	
Patrick MOUTEL	OPPBTT
Régis DORBESSAN	OPPBTT
Benjamin DAUBILLY	FNTP
Jeanne NGO BIBINBE	FNTP

Ce document a été réalisé avec le concours
de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)



